



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UMA
ESTRUTURA DIDÁTICA TIPO CHASSI ESCADA**

**Autor: Marcos Henrique Rodrigues do Amaral
Orientador: Maura Angélica Milfont Shzu
Coorientador: Saleh Barbosa Khalil**

**Gama, DF
2018**



MARCOS HENRIQUE RODRIGUES DO AMARAL

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UMA ESTRUTURA DIDÁTICA TIPO
CHASSI ESCADA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Maura Angélica Milfont Shzu.

Coorientador: Prof. Msc. Saleh Barbosa Khalil.

**Gama, DF
2018**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Amaral, Marcos Henrique Rodrigues do.

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UMA
ESTRUTURA DIDÁTICA TIPO CHASSI ESCADA/

Marcos Henrique Rodrigues do Amaral. Brasília: UnB,
2018. 58 p.: il.; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade UnB Gama, Brasília, 2017. Orientação: Maura
Angélica Milfont Shzu.

1. Chassi. 2. Método dos Elementos finitos. 3. PVC I. Angélica
Milfont Shzu, Maura. II. Título.

CDU Classificação



ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UMA ESTRUTURA DIDÁTICA TIPO CHASSI ESCADA

Marcos Henrique Rodrigues do Amaral

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 26/06/2018 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Eng.: Maura Angélica Milfont Shzu, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Msc. Eng.: Saleh Barbosa Khalil, UnB/ FGA
Coorientador

Prof. Dr. Eng.: Rhander Viana, UnB/ FGA
Membro Convidado

Gama, DF
2018

Esse trabalho é dedicado à minha família
Lettícia, Mara e Marcos, eles são os pilares
do homem que sou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado vida e saúde quando precisei.

Ao meu pai Marcos e minha mãe Mara pela atenção, pelo suporte, pelo carinho e pelo amor ao longo de toda a minha vida.

À minha irmã Lettícia que me fez entender a vida aos cinco anos de idade.

À Fernanda que consegue ser mais que namorada tornando os momentos difíceis em passageiros.

Aos meus tios e primos que sempre estiveram presente no meu viver.

À equipe UnBaja que me fez empolgar nos momentos complicados da faculdade.

Às repúblicas que passei e morei, bem como aos seus integrantes.

Aos meus professores que de alguma forma contribuíram e contribuem para o meu crescimento, vocês são minha segunda família.

“...A felicidade nada
Mais é do que
Hoje estarmos aqui, enfim.” Fernanda Byron.

RESUMO

Este trabalho tem o intuito de comparar um ensaio numérico com um experimento, foi utilizado uma estrutura didática (chassi escada) como parâmetro inicial para fornecer as dimensões e ser utilizado no experimento. Tal estrutura foi construída de policloreto de vinila (PVC). Foram realizadas análises básicas sobre o método dos elementos finitos (MEF) para compreender o uso do ANSYS® e utilizado um método para realizar o experimento. Ao final é apresentado ao leitor as comparações obtidas pelo ensaio numérico e experimento, o meio de comparação foi a rigidez torcional, deslocamento e uma suposta rigidez a flexão. Os resultados na torção foram compreensíveis, mas na flexão o modelo numérico não foi satisfatório. Foram apontadas as possíveis causas.

Palavras-chave: Chassi Escada. PVC. ANSYS®. Simulação. Deslocamento. Experimento de bancada.

ABSTRACT

This work intends to compare a numerical test with an experiment, a didactic structure (chassis ladder) was used as the initial parameter to provide the dimensions and be used in the experiment. Such structure was constructed of polyvinyl chloride (PVC). Basic analyzes were performed on the finite element method (FEM) to understand the use of ANSYS® and a method was used to perform the experiment. At the end is presented to the reader the comparisons obtained by the numerical test and experiment, the means of comparison was the torsional stiffness, displacement and an assumed flexural stiffness. The results in the torsion were comprehensible, but in flexion the numerical model was not satisfactory. The possible causes were pointed out.

Keywords: Ladder Frame. Chassis. PVC. ANSYS®. Simulation. Displacement. Bench experiment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrutura didática tipo escada. (AUTOR).....	01
Figura 2.1 – Chassi Monobloco. (COSTA, 2001-Modificada).	06
Figura 2.2 – Chassi Backbone. (LOPES, 2014)	06
Figura 2.3 – Chassi Spaceframe. (LOPES, 2014)	07
Figura 2.4 – Chassi Escada. (A) Longarina. (B) Travessa. (FURTADO, 2013 - Modificada)	08
Figura 2.5 – Representação para calcular a deflexão angular, θ . (WEIS & PINTO, 2016 - Modificada)	09
Figura 3.1 – Resistencia mecânica x peso molecular de um polímero. (MANO & MENDES, 2004)	11
Figura 3.2 – Representação das dimensões e_1 , e_2 e P_b das conexões conforme a norma NBR 5648 (SOUZA, 2015 – Modificado)	13
Figura 3.3 – Diagrama tensão-deformação (TEÓFILO, 2010)	14
Figura 4.1 – Elemento tipo BEAM 188 e BEAM 189. (ANSYS, 2013. Adaptada)	19
Figura 4.2 – Elemento BEAM 189 (A) com a forma elementar quadrática e BEAM 188 com a forma elementar linear. (ANSYS)	20
Figura 4.3 – Exemplificação dos tipos de refinamento. Refinamento h altera a quantidade de elementos. Refinamento p altera a ordem do polinômio. (AUTOR).	21
Figura 4.4 – Variação do deslocamento com aumento de elementos (AUTOR).	21
Figura 5.1 – Bancada construída para ser utilizada no experimento (AUTOR).	24
Figura 5.2 – Comparação da força de avanço através do teste e analítico (AUTOR).25	

Figura 5.3 – Comparação da força de recuo através do teste e analítico (AUTOR).	26
Figura 5.4 – Equipamento disponível, porém não utilizado (RAE, 2018).	26
Figura 5.5 – Equipamento utilizado (TECNO, 2018).	27
Figura 5.6 – (1) Demarcação da posição da bancada. (2) Demarcação das posições do traçador de altura. (3) Atuador pneumático no experimento de torção (Autor).	29
Figura 5.7 – Pontos onde serão medidos os deslocamentos e ponto onde será aplicado a força (ANSYS – modificada).	31
Figura 5.8 – Pontos onde serão aplicadas as forças e serão medidos os deslocamentos na torção (ANSYS – Modificada).	31
Figura 6.1 – Relação dos deslocamentos no ponto 1 e 2 do experimento com o deslocamento calculado no ensaio numérico (AUTOR).	33
Figura 6.2 – Relação dos deslocamentos no ponto 3 e 4 do experimento com o deslocamento calculado no ensaio numérico (AUTOR).	33
Figura 6.3 – Relação dos deslocamentos no ponto 3 e 4 do experimento com o deslocamento calculado no ensaio numérico (AUTOR).	35
Figura 6.4 – Relação da Rigidez no experimento à torção e à flexão. No eixo primário (esquerda) estão os valores da rigidez à torção e no eixo secundário (direita) estão os valores da rigidez à flexão. As curvas contínuas são obtidas por ensaio e as tracejadas são por experimento (AUTOR).	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensões dos tubos conforme NBR 5648. (SOUZA, 2015)	.....12
Tabela 3.2 - Dimensões das conexões conforme NBR 5648. (SOUZA, 2015)	.....12
Tabela 3.3 – Módulo de elasticidade do PVC rígido à temperatura ambiente.	.....15
Tabela 3.4 – Coeficiente de Poisson do PVC rígido à temperatura ambiente.	.....15
Tabela 3.5 – Massa específica do PVC rígido à temperatura ambiente.	.....15
Tabela 4.1 – Relação de mudança com tamanho do elemento.	21
Tabela 5.1 – Dimensões do perfil de bancada (AUTOR)	.....23
Tabela 5.2 – Resultados do ensaio do Atuador Pneumático.	.....25
Tabela 6.1 – Resultados do experimento da estrutura didática (AUTOR).	32
Tabela 6.2 – Deslocamentos em “z” nos ensaios (AUTOR).	.....32
Tabela 6.3 – Erros experimentais para o ensaio de flexão (AUTOR).	34
Tabela 6.4 – Rigidez à torção para Ensaio Numérico (AUTOR).	.....34
Tabela 6.5 – Rigidez à torção para Experimento (AUTOR).	.....35
Tabela 6.6 – Erro Relativo (AUTOR).	35
Tabela 6.7 – Relação da força com deslocamento no Experimento (AUTOR).	36
Tabela 6.8 – Relação da força com deslocamento no Ensaio (AUTOR).	36

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
SUMÁRIO	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. METODOLOGIA	2
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. CHASSI.....	4
2.1.1. História do chassi	5
2.2. TIPOS DE CHASSI	5
2.2.1. Chassi monobloco	5
2.2.2. Backbone	6
2.2.3. Spaceframe	6
2.2.4. Chassi escada	7
2.3. ESTRUTURA DIDÁTICA	8
2.4. RIGIDEZ TORCIONAL.....	9
3. CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PVC	10
3.1. OBTENÇÃO	10
3.2. ESPECIFICAÇÃO DOS TUBOS E CONEXÕES.....	11
3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	13
4. MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS	16
4.1. O MEF.....	16
4.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	17
4.3. PROGRAMA	18
4.3.1. ANSYS®.....	18
4.3.2. Funcionamento.....	19
4.3.3. Elemento <i>BEAM 189</i>	19
4.3.4. Análise do elemento	21
5. MÉTODO EXPERIMENTAL	23
5.1. ESTRUTURA DIDÁTICA	23
5.2. BANCADA.....	24
5.3. ATUADOR PNEUMÁTICO.....	25
5.4. INSTRUMENTO DE MEDIÇÕES.....	27
5.5. MÉTODO DE MEDIDA	29
5.6. MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
7. CONCLUSÃO	41
8. TRABALHOS FUTUROS	42
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
10. ANEXOS	47
I. Anexo - Dimensões dos Tubos e Conexões	48
II. Anexo – Catálogo Tigre® (Montagem).....	50
III. Anexo – Roteiro numérico do chassi.....	51

IV.	Anexo - Roteiro numérico da bancada.....	55
V.	Anexo – Dimensões do Atuador Pneumático.....	58
VI.	Anexo – Cotas do Chassi.....	59
VII.	Anexo – Cotas da Bancada	60
VIII.	Anexo – Memoriais de cálculo	61
IX.	Anexo – Dados Experimentais. Deslocamentos nos pontos seleccionados.	62
X.	Anexo – Teste do atuador pneumático.	63

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

O interesse deste trabalho iniciou após meu contato com a disciplina de Análise Estrutural Métodos dos Elementos Finitos ministrada pela Prof. Dr. Eng. Maura Angélica Milfont Shzu na Faculdade UnB do Gama da Universidade de Brasília e teve como ponto de partida o trabalho “Análise Estrutural de um Modelo em Escala Reduzida de Chassi Automotivo pelo Método dos Elementos Finitos” de Alba et al. (2015), orientado pela mesma.

Através do contato com o trabalho Alba et al. (2015) foi possível ter acesso à estrutura didática construída com canos de policloreto de vinila (PVC) pelo Prof. Msc. Eng. Saleh Barbosa Khalil como mostrado na Fig. (1.1).

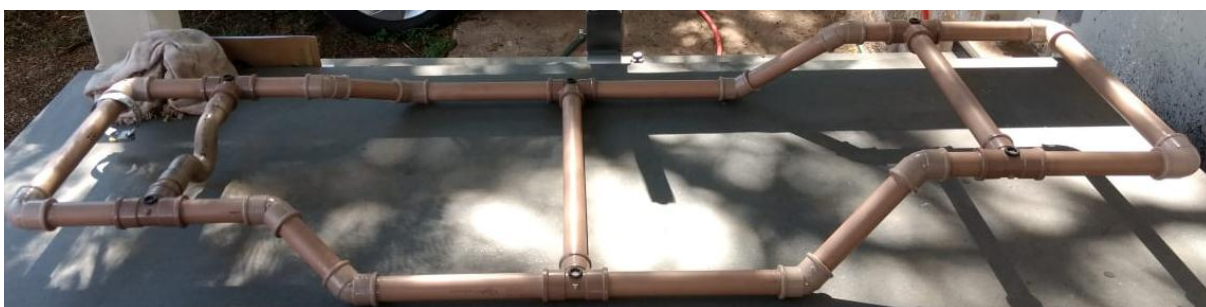


Figura 1.1 – Estrutura didática tipo escada. (AUTOR)

Após as análises realizadas por Alba et al. (2015) foi possível questionar se é possível comparar de forma numérica e experimental tal estrutura, comprovando ou não a modelagem numérica escolhida através dos resultados obtidos experimentalmente.

1.2. OBJETIVOS

O atual trabalho visa comparar ensaios realizados numericamente e experimentalmente. Para realizar tal comparação é necessário:

- Desenvolver e definir as condições de contorno para um modelo numérico;
- Realizar um modelo experimental fundamentado nos equipamentos disponíveis;
- Desenvolver bancada experimental;
- Executar o experimento;

- Ajustar o modelo numérico conforme o modelo experimental e realizar os ensaios numérico;
- Comparar os resultados;
- Apontar os possíveis erros;

1.3. METODOLOGIA

Inicialmente foi definido o objetivo do trabalho e a partir disso foi desenvolvida a revisão bibliográfica. Neste passo foram selecionados autores que descreveram sobre uso do software, de chassi, de experimento e de PVC. Assim, foram realizadas as seguintes etapas:

- (I) Estudo das propriedades do PVC;
- (II) Estudo do Método dos Elementos Finitos (MEF);
- (III) Modelar ensaio numérica;
- (IV) Modelar experimento;
- (V) Desenvolver a bancada experimental;
- (VI) Realizar experimento;
- (VII) Remodelar o ensaio numérico;
- (VIII) Realizar do ensaio numérico;
- (IX) Comparar resultados e apontar possíveis erros;
- (X) Escrita da monografia;

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra assim dividido:

Capítulo 1 – Contém introdução objetivo e metodologia sobre o conteúdo presente.

Capítulo 2 – Revisão (bibliográfica) como os tipos de chassi, breve história dos chassis, estrutura didática e sobre a rigidez torcional, que é um dos métodos de comparação.

Capítulo 3 – Materiais utilizados para a fabricação do chassi e sobre suas propriedades mecânicas.

Capítulo 4 – Método computacional, modelo numérico e sobre os ensaios numéricos realizados.

Capítulo 5 – Método experimental, ferramentas utilizadas, bancada construída e montagem do sistema.

Capítulo 6 – Apresentação dos resultados e as discussões.

Capítulo 7 – Conclusão.

Capítulo 8 – Trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O automóvel foi concebido no século XVIII, após a criação do motor a vapor, e somente com a invenção do motor alternativo de Karl Benz, no século XIX, foi rotulado automóvel. inicialmente os automóveis tinham o intuito restrito de transporte militar, uma vez que foram desenvolvidos para transportar peças de artilharia (GILLESPIE, 1992 e FURTADO & ÁVILA, 2013).

A finalidade de transporte civil só surgiu no final do século XIX com a utilização dos motores à gasolina. No século XX a indústria automobilística já estava bem estruturada nos Estados Unidos com o Modelo T e na Europa, empresas eram fundadas com mais de 600 modelos produzidos (GILLESPIE, 1992 e FURTADO & ÁVILA, 2013).

No Brasil, as indústrias só desenvolveram após a criação do Grupo Executivo da Indústria Automobilística (GEIA) em 1956 (CARROANTIGO, 2017). Hoje, o INOVAR-AUTO é o programa que incentiva, colocando metas e recompensando, as montadoras para o desenvolvimento da tecnologia voltada aos automóveis (INOVAR-AUTO, 2017).

2.1. CHASSI

O principal elemento do veículo, para Lopes (2014), é o chassi, ele é responsável por agrupar suportar e fixar todos os componentes necessários. É desejado também que essa principal estrutura seja rígida e leve. A rigidez está ligada diretamente à dirigibilidade e a leveza ligada à resistência a inércia e a rolagem do veículo.

Segundo Oliveira (2007) a rigidez elevada é benéfica ao automóvel, porém, há pontos negativos, sendo assim é necessária uma análise com parâmetros que relacionem o peso, a rigidez, a fabricação e o custo, selecionando nesses fatores o mais desejado no escopo do projeto. Para Costa (2001) essas estruturas não podem ser demasiadamente rígidas, pois em caso de choque elas devem absorver o impacto, não transferindo para os condutores, e, se fraca, elas podem abater-se sobre eles.

Segundo Soares (2012) a rigidez à torção de um veículo além de ser um parâmetro importante para a qualificação do chassi, proporciona também

comportamento estável e previsível. Ele deve ser dimensionado a fim de resistir aos esforços característicos do veículo.

2.1.1. História do chassi

Há registros que os primeiros chassis e carrocerias foram construídos entre 1896 e 1910 e eram estruturas feitas em maior parte de madeira. Diferentes tipos de madeira eram utilizados em diferentes partes do corpo do veículo e eram fixadas umas às outras por meio de parafusos ou chapas forjadas (LIVESEY & ROBINSON, 2005).

Conforme a necessidade de produzir mais, a maneira de construir começou a deixar de ser artesanal. As chapas que eram forjadas à mão começaram a ser moldadas e as madeiras começaram a ser utilizadas apenas como estruturas. Por volta de 1923 iniciou a tentativa de construir em aço, porém, em 1927 houve aplicação por conseguir produzir formas complexas permitindo, em 1930, a produção em massa (LIVESEY & ROBINSON, 2005).

2.2. TIPOS DE CHASSI

O chassi pode ser construído de forma separado ou integrado com a carroceria, quando integrado é inserido reforços. O objetivo do chassi integrado partiu da indústria aeronáutica, a fim de fortalecer a estrutura e sem adição de peso desnecessário (LIVESEY & ROBINSON, 2005). Pode-se ver os diferentes tipos de chassi a seguir.

2.2.1. Chassi monobloco

Para Furtado & Ávila (2013) o chassi mais utilizado atualmente é o chassi tipo Monobloco, ele consiste na união do chassi e carroceria em uma só peça. Para que essa peça resista como um composto de chassi-carroceria é necessário que o monobloco tenha reforços em certas regiões, variando a cada projeto.

O monobloco apresenta várias vantagens, a principal é a redução de peso por não apresentar uma estrutura conjugada para elevar a rigidez. O custo de fabricação é relativamente alto e é necessário grande investimento na parte de estampagem, levando o lucro apenas para grande escala de produção (COSTA, 2001). O chassi tipo monobloco pode ser visto na Fig. (2.1) a seguir.

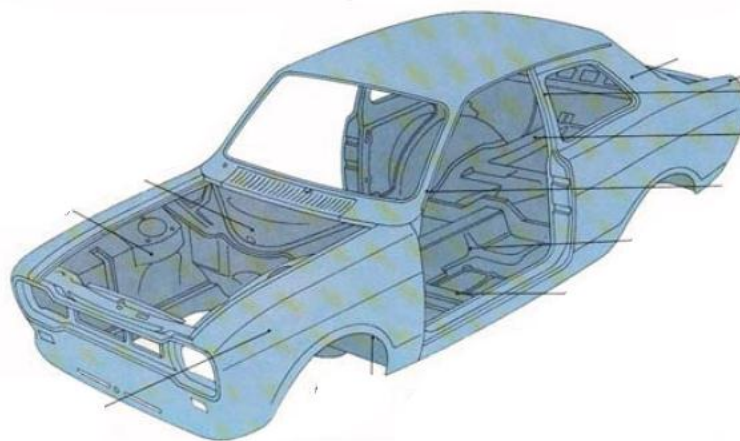


Figura 2.1 – Chassi Monobloco. (COSTA, 2001-Modificada)

2.2.2. Backbone

Desenvolvida em 1962 por Colin Chapman, essa estrutura é simples por apresentar apenas um túnel central bastante rígido. Além de suportar todos os componentes essenciais do veículo ele tem a função de ligar os eixos do veículo funcionando como túnel para transmissão (OLIVEIRA, 2007).

As desvantagens, para Lopes (2014), é que esse túnel central ocupa um grande volume no habitáculo, comprometendo conforto e espaço dos passageiros, além de ser difícil a manutenção dos sistemas de que ficam dentro do túnel. O chassi Backbone pode ser visto na Fig. (2.2) a seguir.

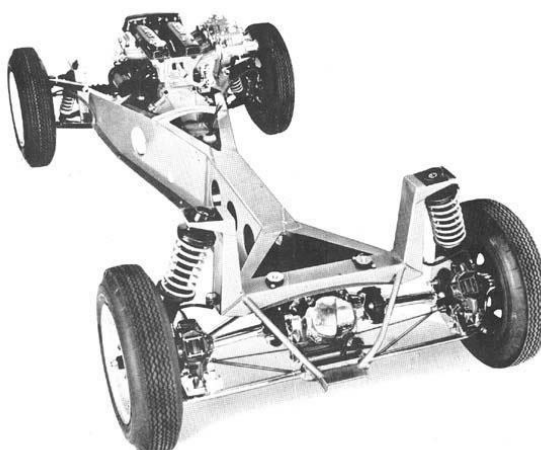


Figura 2.2 – Chassi Backbone. (LOPES, 2014)

2.2.3. Spaceframe

Conhecido também como chassi tubular ou gaiola, essa estrutura é desejada por apresentar elevada rigidez à torção e peso inferior relacionado aos outros tipos

de estrutura. Os benefícios estão na facilidade em realizar reparos pontuais e na acessibilidade dos sistemas. Para projetos de pequeno porte os benefícios estão na facilidade de montagem e no custo (LOPES, 2014).

Essa estrutura foi aplicada inicialmente em aviões na Segunda Guerra Mundial e posteriormente copiadas por entusiastas para desenvolver carros esportivos. Para a produção em larga escala esse tipo de estrutura se torna caro e difícil. A configuração complexa e a dificuldade em conectar os tubos, nos quais são utilizados na maioria das vezes, torna inviável para esse tipo de produção (OLIVEIRA, 2007). Pode-se ver o chassi tipo gaiola na Fig. (2.3) a seguir.



Figura 2.3 – Chassi Spaceframe. (LOPES, 2014)

2.2.4. Chassi escada

Para Patil e Deore (2015) esse tipo de chassi é o mais antigo. Para Furtado (2013) os principais componentes são duas barras longitudinais, longarinas, ligadas por barras menores, travessas, conforme a Fig. (2.4) a seguir. A quantidade de travessas está ligada proporcionalmente com a rigidez do veículo.

Oliveira (2007) diz que o formato do perfil influencia também a rigidez do veículo, para projetos mais baratos e fáceis a utilização do perfil aberto é indicada, pois são facilmente fixados outros componentes. Perfis fechados são utilizados em veículos de passageiros pois oferecem maior rigidez e uma melhor estabilidade.

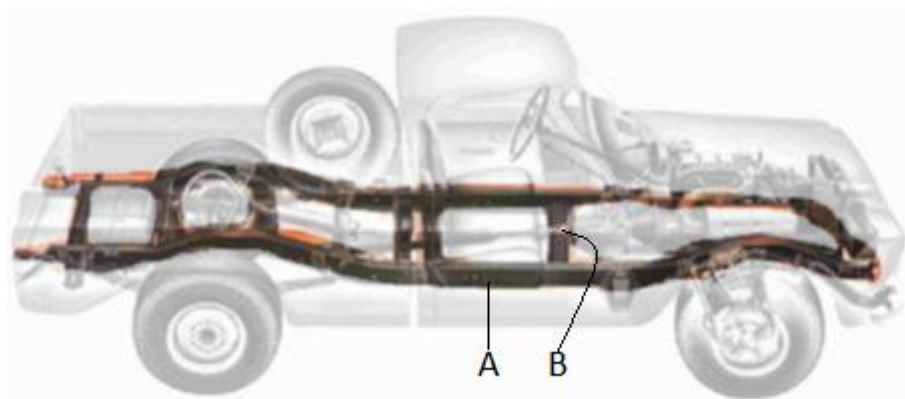


Figura 2.4 – Chassi Escada. (A) Longarina. (B) Travessa (FURTADO, 2013 - Modificada).

Este tipo de chassi é direcionado para veículos que suportam grande massa e atingem velocidades lentas. Para veículos de alta performance ele não é indicado, pois para manter uma alta rigidez à torção é necessário o aumento da quantidade de travessas e da dimensão das longarinas. Uma saída para o aumento da rigidez torcional é a configuração das travessas em “X” (LOPES, 2014).

Este será o chassi estudado no atual trabalho, foi escolhido por estar presente no transporte de cargas no Brasil e ser um dos responsáveis em movimentar a economia brasileira (TEDESCO, 2011).

2.3. ESTRUTURA DIDÁTICA

Para Santos Jr. & Marcondes (2010) o modelo didático é o sistema que liga o pensamento à realidade, transmitindo conhecimento. Tem sempre um caráter provisório de transmissão da realidade, sendo o recurso para desenvolver e fundamentar o conhecimento prático.

Para Olmo Et. al (2014) o conhecimento está cada vez mais atraente, porém ainda há desinteresse por parte dos alunos. Sendo assim, são necessárias novas metodologias para que haja integração entre o conteúdo e a prática, incluindo o aluno no processo de aprendizagem.

Desta forma, foram utilizados os tubos comerciais destinados à construção civil, fora de seu objetivo de fabricação, apenas para compor tema base de tal trabalho, utilizando propriedades mecânicas adquiridas de outros trabalhos e bibliografias a fim de aplicar na prática os conceitos teóricos.

2.4. RIGIDEZ TORCIONAL

Para comparar, a simulação numérica com o experimento, pode-se utilizar o deslocamento, na flexão, e da rigidez torcional, na torção. A rigidez torcional conforme Weis & Pinto (2016) é o parâmetro de comparação mais importante, ela que define se o chassi possui as características desejadas. Conforme a Eq. (2.1) a rigidez torcional é a relação de torque aplicado a estrutura e o ângulo que ela deflete.

$$K_t = \frac{T[N.m]}{\theta[^\circ]} \quad (2.1)$$

Para encontrar o $\theta[^\circ]$ é necessário utilizar a trigonometria e para encontrar o torque é necessário conhecer a força e seu braço de alavanca. Na Figura (2.5) é representado um esquema onde encontra-se a relação da força e o ângulo.

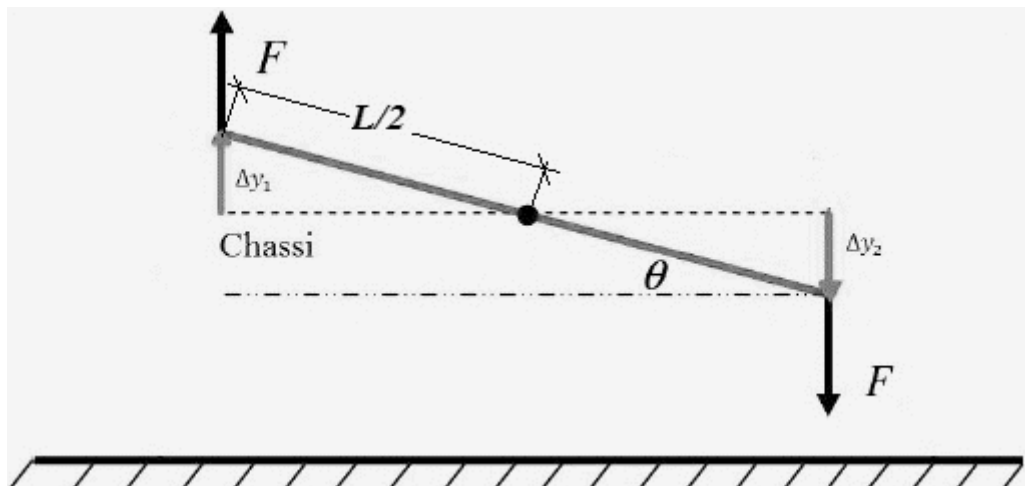


Figura 2.5 – Representação para calcular a deflexão angular, θ (WEIS & PINTO, 2016 - Modificada).

3. CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PVC

A descoberta do PVC iniciou em 1835 com Justus von Liebig e Victor Regnaut, posteriormente A.W. Hoffman em 1860 relatou a polimerização, em 1872 E. Baumann descreveu o monômero, em 1912 Fritz Klatte descobriu o processo de fabricação e, finalmente, em 1926 E. Semon descobriu como plastificar, substituindo a borracha em diversas aplicações (NUNES Et al., 2006).

O PVC foi comercializado em larga escala durante a Segunda Guerra Mundial (SOUZA, 2015). Esse plástico, dependendo dos aditivos, pode apresentar diversas características distintas, sua composição apresenta 57 % de cloro e 43 % de insumos do petróleo e/ou gás natural (NUNES Et al., 2006).

Segundo Souza (2015) o PVC é um material termoplástico, isto é, se torna maleável com aumento de temperatura e pressão e, quando cessadas, ele retorna às suas características iniciais. Essa característica influi na vasta aplicação, permitindo que ele seja reciclado e conformado diversas vezes.

Para Nunes Et.al (2006) outro fator que influencia a comercialização é o seu custo barato, vida útil elevada, vasta aplicação e versatilidade, tornando-o o segundo termoplástico mais consumido em todo o mundo.

3.1. OBTENÇÃO

O PVC é um produto composto por unidades que se repetem, conhecido como monômeros, formando os polímeros. As palavras gregas *poli* e *meros* significam vários e partes, respectivamente (SOUZA, 2015). Para Mano (1991) os plásticos são macromoléculas fabricadas a partir de monômeros obtidos de forma sintética (*polímeros sintéticos*) e/ou natural (*polímeros naturais*).

A obtenção do PVC inicia com a obtenção do seu monômero, conhecido como Monômero de Cloreto de Vinila (MVC). Para obter o MVC é necessário obter o cloro, podendo ser de origem marinha ou da terra (sal-gema), e o eteno retirado do petróleo, gás natural ou etanol (NUNES Et al., 2006).

A partir do monômero e seus subprodutos pode ser obtido o PVC em três etapas, a primeira é a iniciação, onde é fornecido calor aos monômeros e inicia a decomposição originando o radical livre. A segunda é a propagação onde há consecutivas transferências do radical livre até que todos os monômeros sejam consumidos. A terceira é a terminação onde pode ocorrer de duas maneiras, por

combinação e por desproporcionamento, a primeira duas macromoléculas se unem e na segunda não (NUNES Et al., 2006).

Para iniciar o processo de transformação do MVC em PVC é necessário adicionar calor. Após essa etapa é necessário regular a temperatura, pois esta interfere o peso molecular, as propriedades mecânicas, a porosidade e também a absorção de aditivos e plastificantes. do produto. A figura (3.1) relaciona a resistência à tração e o peso molecular (MANO & MENDES, 2004).

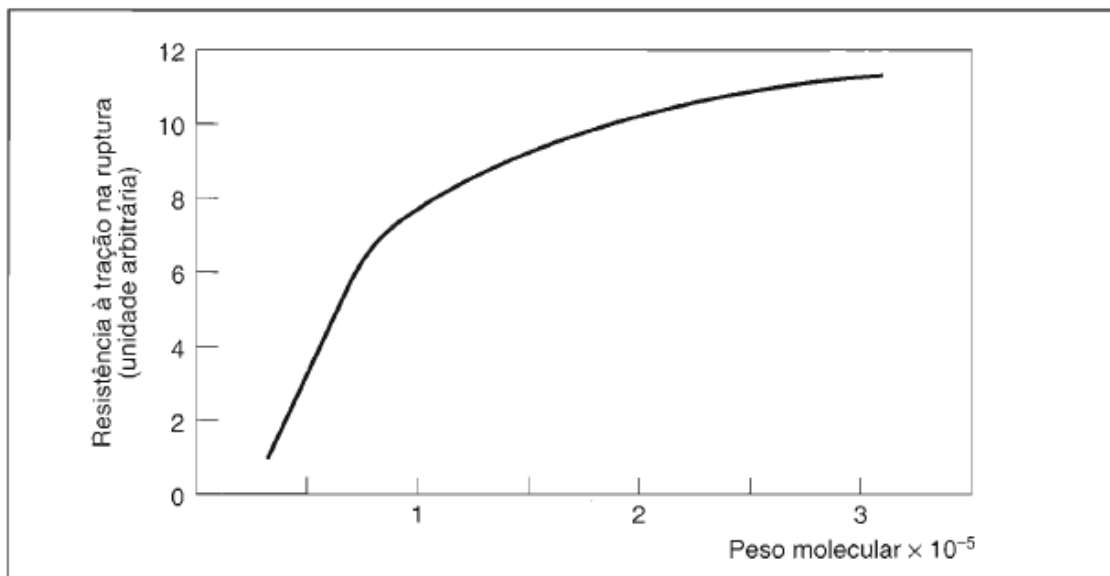


Figura 3.1 – Resistencia mecânica x peso molecular de um polímero (MANO & MENDES, 2004).

3.2. ESPECIFICAÇÃO DOS TUBOS E CONEXÕES

Conforme Souza (2015) os tubos PVC não são destinados à utilização estrutural, eles seguem a Norma Brasileira (NBR) para aplicações na construção civil. A NBR 5648 determina que os tubos suportem pressão de serviço de até 750 kPa e tenha dimensões conforme a Tab. (3.1) mostrada a seguir.

As conexões também são especificadas na norma NBR 5648 e devem suportar a mesma pressão de serviço dos tubos, as dimensões das paredes (e_1 e e_2) e profundidade da bolsa (P_b), conforme mostrado na Fig. (3.2) e na Tab. (3.2) a seguir

Os tubos e as conexões utilizadas para a montagem da estrutura didática são de diâmetro externo (DE) 25, com dimensões de 25 mm de diâmetro externo e 1,7 mm de espessura da parede conforme a Tab. (3.1).

Tabela 3.1 – Dimensões dos tubos conforme NBR 5648 (SOUZA, 2015).

Diâmetro nominal DN	Diâmetro externo DE	Diâmetro externo médio mm		Espessura da parede mm	
		d_{em}	Tolerância	e	Tolerância
15	20	20,0	+ 0,2	1,5	+0,3
20	25	25,0		1,7	
25	32	32,0		2,1	+0,4
32	40	40,0		2,4	
40	50	50,0		3,0	
50	60	60,0		3,3	+0,5
65	75	75,0	+ 0,3	4,2	+0,6
75	85	85,0		4,7	
100	110	110,0		6,1	+0,8

Tabela 3.2 - Dimensões das conexões conforme NBR 5648 (SOUZA, 2015).

Diâmetro externo DE	Espessura mínima de parede da bolsa mm	Espessura mínima de parede do corpo mm	Profundidade mínima de bolsa mm
	(e1)	(e2)	(Pb)
20	2,4	3,0	16,0
25	2,6	3,2	18,5
32	2,9	3,6	22,0
40	3,2	4,0	26,0
50	3,6	4,5	31,0
60	3,9	4,9	36,0
75	5,2	6,5	43,5
85	5,5	6,9	48,5
110	6,0	7,5	61,0

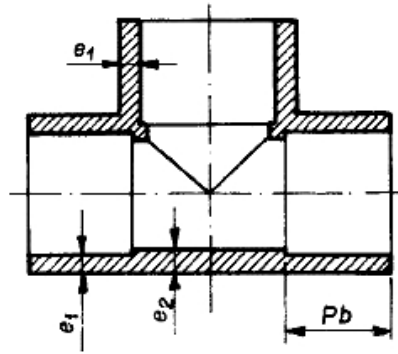


Figura 3.2 – Representação das dimensões e_1 , e_2 e P_b das conexões conforme a norma NBR 5648 (SOUZA, 2015 – Modificado).

3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dos materiais são encontradas através de ensaios que demonstram sua capacidade de transmitir ou resistir um determinado esforço (SOUZA, 2015). O presente trabalho não está focado em realizar ensaios para obter as propriedades mecânicas do PVC, tais propriedades serão obtidas por fontes bibliográficas, tomando-as como estimadas.

As propriedades mecânicas do PVC podem ser alteradas por diversos fatores como, já dito anteriormente, peso molecular, aditivos, estabilizantes, plastificantes e temperatura de fabricação.

3.3.1. Tensão e Deformação

A tensão de engenharia, segundo Teófilo (2010), é a resistência interna no corpo de uma força externa que age sobre ele. A tensão pode ser definida pela Eq. (3.1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Onde a σ (sigma) é a tensão média geral, e (A) é a área da seção transversal do corpo perpendicular à força aplicada.

A deformação de engenharia é definida como o deslocamento do corpo sobre o comprimento do corpo inicial, conforme a Eq. (3.2)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2)$$

Onde ε (épsilon) é a deformação e l_0 é o comprimento inicial do corpo.

A partir da *Lei de Hooke* ($F = k \cdot x$) a tensão e a deformação podem ser relacionadas, originando a Eq. (3.3)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

Onde E (módulo de elasticidade ou módulo de Young) é a rigidez do material. Para os materiais poliméricos o valor do módulo de elasticidade varia entre 0,007 a 4 GPa, já os metais podem possuir o módulo de elasticidade até cem vezes maior (TEÓFILO, 2010).

A relação tensão-deformação pode ser demonstrada por diagrama, segundo a Fig. (3.3), onde é demonstrado as fases que um material pode experimentar, conforme a quantidade de tensão é aplicada (SOUZA, 2015).

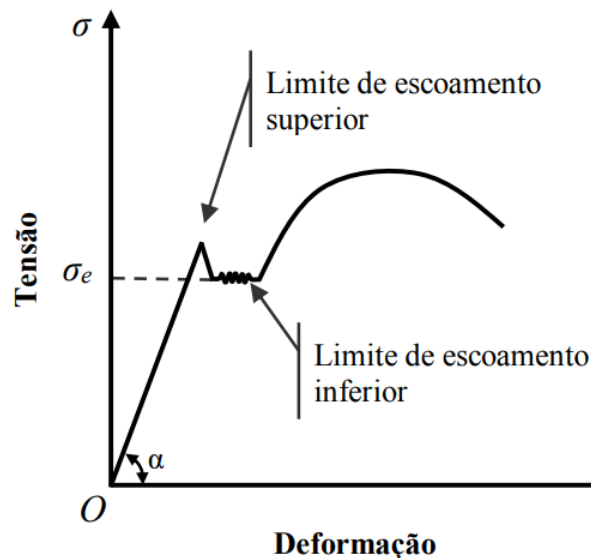


Figura 3.3 – Diagrama tensão-deformação (TEÓFILO, 2010).

A fase linear é a primeira etapa do gráfico, ela situa entre o ponto O (origem do gráfico) e ligeiramente antes do limite de escoamento. Nessa etapa o material não sofre deformações permanentes, se retirada a tensão ele retorna a suas dimensões originais (SOUZA, 2015). O coeficiente angular representado por α na Fig. (3.3) é igual ao módulo de elasticidade (CALLISTER & RETHWISCH, 2016).

Conforme Callister & Rethwisch (2016) quando aplicado uma tensão de tração uniaxial em determinado material, haverá alongamento nesse eixo e contrações nos eixos perpendiculares. Se a contração for igual para os eixos perpendiculares pode-se classificar o material como isotrópico.

Para esses materiais é possível calcular o coeficiente de Poisson (ν) relacionando a deformação de alongamento e contração. A Eq. (3.4) relaciona a deformação de alongamento (ε_z) com as deformações de contração (ε_x e ε_y).

$$\varepsilon_y = \varepsilon_x = -\nu \cdot \varepsilon_z \quad (3.4)$$

É apresentado na Tab. (3.3) o módulo de elasticidade a partir de cada autor, foi escolhido, a princípio, o módulo de elasticidade (E) como 2,5 GPa. O coeficiente de Poisson foi escolhido como 0,38, conforme os valores apresentados na Tab. (3.4). A massa específica escolhida foi de 1450 kg/m³, dentro do intervalo apresentado na Tab. (3.5).

Tabela 3.3 – Módulo de elasticidade do PVC rígido à temperatura ambiente.

Autor	Módulo de Elasticidade em (GPa)
GRIZZO, <i>Et al.</i> , 2011	2,5 – 3,5
SOUZA, 2015	1,69
NUNES, <i>Et al.</i> , 2006	2,5 – 3,5
CALLISTER & RETHWISCH, 2016	2,41 – 4,14

Tabela 3.4 – Coeficiente de Poisson do PVC rígido à temperatura ambiente.

Autor	Coeficiente de Poisson
SOUZA, 2015	0,3825
CALLISTER & RETHWISCH, 2016	0,38

Tabela 3.5 – Massa específica do PVC rígido à temperatura ambiente.

Autor	Massa Específica (kg/m³)
NUNES <i>Et. al.</i> , 2006	1400
CALLISTER & RETHWISCH, 2016	1300 – 1580

4. MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

Conforme Fish (2009), as equações diferenciais parciais podem descrever a maioria dos fenômenos de engenharia e ciências, porém resolver tais equações é quase impossível. O método de aproximação numérica para solucionar essas equações de forma aproximada é conhecido com método dos elementos finitos (MEF).

A ideia do MEF foi desenvolvida na década de 1950 pela engenharia aeroespacial com diversos engenheiros, o objetivo era analisar a distribuição de tensões em chapas de aviões, mísseis e cápsulas espaciais. Em 1960 o termo MEF foi citado pela primeira vez por R. W. Clough (SORIANO & LIMA, 2003).

Anos após a primeira citação E. Wilson desenvolveu o primeiro programa em elementos finitos. O programa ficou popularizado por ser livre e grupos acadêmicos o testaram, confirmando sua força e versatilidade. Posteriormente, foram lançados programas como NASTRAM, ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS e outros (FISH, 2009).

Atualmente os programas são peças essenciais na engenharia, sendo cada vez mais difundidos e impulsionados pelas demandas industriais (MORAES, 2015). Para Silva Et al. (2001) o uso de programas baseado nesse método é a saída mais simples, sendo bastante abrangente e solucionando problemas estruturais, de transferência de calor, de eletromagnetismo, de mecânica dos fluidos e entre outros.

4.1. O MEF

O estudo de estruturas adquiriu ao decorrer do tempo os chamados modelos matemáticos que, com o avanço da tecnologia e cálculo computacional, proporcionou grande desenvolvimento nos modelos físicos reais, convergindo cada vez mais para solução exata. O MEF é comumente utilizado e consegue descrever sistemas contínuos abrangendo a maioria das análises da engenharia (SORIANO, 2009).

Em resumo o MEF divide o meio contínuo em vários elementos, solucionando aproximadamente o sistema contínuo, com suas condições de contorno, através da solução de cada elemento (ASSAN, 2003). Para Filho (2013) a mente humana não consegue compreender todo o comportamento do sistema sem subdividi-lo em partes. É necessário entender o comportamento dos elementos para que possa assimilar o todo.

Assim pode-se determinar a deformação de uma estrutura a partir do deslocamento dos nós. A partir dos deslocamentos nodais é possível determinar as tensões, esforços internos e avaliar a resistência estrutural do objeto. Esses parâmetros são conhecidos também como *variáveis de estado* (FILHO, 2013).

Para Kim et all (2011) o princípio básico do MEF é dividir o meio contínuo, identificar os graus de Liberdade (GLs) e depois descrever as equações de cada elemento, os relacionando-os com os elementos vizinhos. Essas equações são complexas e o método as relaciona com polinômios aproximando-as a solução exata.

Uma das soluções utilizadas para resolver tais equações é a solução de resíduos ponderados, onde é considerada uma equação residual conforme a Eq. (4.1).

$$\int_0^l R(x)W(x)dx = 0 \quad (4.1)$$

Para Galerkin o resíduo, $R(x)$, e a função peso, $W(x)$ são iguais à solução aproximada e à função de aproximação, respectivamente. A solução aproximada e a função de aproximação, $\tilde{u}(x)$, podem ser relacionadas a partir da Eq. (4.2).

$$\tilde{u}(x) = \sum_{i=1}^N c_i \phi_i(x) \quad (4.2)$$

Assim substituindo a solução aproximada, que varia para cada estrutura, e a função de aproximação nos resíduos ponderados pode-se obter, após manipulação matemática, a Eq. (4.3)

$$[K]_{(NxN)}\{c\}_{Nx1} = \{F\}_{Nx1} \quad (4.3)$$

Onde as variáveis que se deseja encontrar é a matriz de coeficiente, $\{c\}$. Encontrando-a pode-se obter a função de deslocamento do elemento. A Equação (4.3) é assemelhada a equação já citada, *Lei de Hooke*, ($F = k.x$), onde $[K]$ pode ser lida como a matriz de rigidez e $\{F\}$ a matriz de forças.

4.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Segundo Souza (2015) a aplicação de software de simulação contribui para redução dos custos e tempo em projetos. O MEF está disponível como ferramenta computacional permitindo a sua aplicação, fornecendo ao usuário as soluções que necessitam ser interpretadas.

Os programas de análise estão acompanhados de ferramentas gráficas que ajudam na solução, diminuindo o trabalho do engenheiro. No entanto, a qualidade técnica ainda prevalece (OLIVEIRA, 2007).

Conforme a evolução dos softwares, a aplicação do MEF está sendo utilizado correntemente e a interpretação dos resultados nos ajuda a compreender o comportamento do sistema diminuindo o número de testes físicos e tempo de desenvolvimento. O software escolhido para o presente trabalho é o ANSYS®, o foco da companhia é a solução de projetos na área de trabalho desde o conceito de projeto até a fase final de teste e validação (MÜLLER, 2002).

A escolha do ANSYS® foi justificada pela:

- (I) Afinidade do operador;
- (II) Continuação do trabalho iniciada por Alba et al. (2015);
- (III) Disponibilidade oferecida na faculdade;
- (IV) Enorme confiabilidade do programa na engenharia;

Além de outros benefícios que são aplicados a engenharia de maneira geral, como custo de modificação no início do projeto, validação, custo no projeto como todo, flexibilidade de mudança, aperfeiçoamento e previsão do comportamento do sistema.

4.3. PROGRAMA

4.3.1. ANSYS®

A empresa que criou o ANSYS® foi desenvolvida na década de 1970 com o nome de Swanson Analysis Systems pelo engenheiro John Swanson. O engenheiro foi pioneiro no uso do MEF e desenvolveu seu principal produto, o software. Posteriormente, a empresa passou a ser chamada de ANSYS, Inc. e estendeu seu principal produto em várias áreas, como na dinâmica dos fluidos.

O ANSYS® foi utilizado em larga escala no final dos anos de 1970 para o desenvolvimento de usinas nucleares e foram abordados cargas transitórias, variações de temperaturas e outros fatores que tornaria o projeto mais oneroso. Antes da utilização dos softwares os sistemas eram divididos em componentes e tratados como elementos de viga, porém era complicado realizar um pós-processamento como hoje, pois não haviam gráficos que apontavam pontos críticos (MÜLLER, 2002).

Em 2013 a FERRARI® utilizou o software ANSYS® para realizar testes de aerodinâmica com o intuito de participar de competições melhorando confiabilidade, segurança e velocidade. O ponto chave da simulação é a variedade de alternativas e o tempo reduzido (CARDILE, 2013).

4.3.2. Funcionamento

O funcionamento do ANSYS® resume-se em três grandes etapas: *pré-processamento*, “*solver*” e *pós-processamento*. O pré-processamento é a etapa responsável por identificar a região de trabalho, desenho da geometria e processo de criação de malha. Nessa primeira etapa pode-se definir *pontos*, *linhas*, *áreas* e *volumes* do sistema, outro ponto importante é decidir o tipo de malha que será utilizada e o tamanho dessa malha. Como já falado anteriormente, o tamanho da malha pode ser uma variável importante no pós-processamento (REYNOL, 2008).

A etapa “*solver*” corresponde a aplicação de cargas e restrições do sistema, isso resume a condições de contorno do sistema, lembrando que nessa etapa a malha já está pronta. A última etapa é o pós-processamento, essa é feita automaticamente, não há interação. Essa etapa faz a associação das equações diferenciais parciais sobre todo o volume especificado transformando essa associação em um sistema de equações e resolvendo esse sistema de equações (REYNOL, 2008).

Como foi falado anteriormente, através da aproximação, as soluções desse método também serão aproximações, porém, no método computacional, é possível alterar o tipo de elemento e o grau de refinamento, investindo menos tempo e obtendo resultados convergentes.

4.3.3. Elemento *BEAM 189*

O tipo de elementos utilizado no presente trabalho é o *BEAM 189*. Na biblioteca do Ansys o *BEAM 189* é originado do *BEAM 188* onde é acrescentado ao primeiro a forma quadrática (não linear) no elemento de linha, Fig. (4.1). Este tipo de elemento é utilizado para aplicações lineares em rotação e não lineares na deformação (ANSYS, 2013).

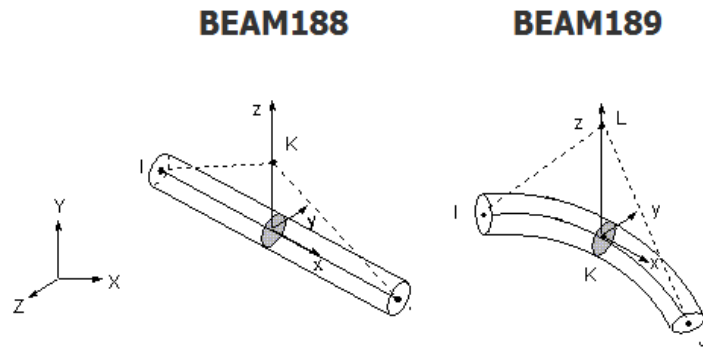


Figura 4.1 – Elemento tipo *BEAM 188* e *BEAM 189*. (ANSYS, 2013. Adaptada)

O estudo do tipo de elemento foi realizado pelo Alba, et al (2015), ele nos mostra que para cada elemento pode ser avaliado o custo computacional, a aproximação e a necessidade de refinamento para convergência de resultado. O tipo de elemento sugerido, com base na análise de Alba Et. al (2015), é o *BEAM 189*.

O elemento *BEAM 189* é recomendado para ser utilizado em estruturas delgadas, ele segue a teoria de Timoshenko, incluindo os efeitos de deformação e cisalhamento. Ele é recomendado para estruturas com encurvamentos de seções transversais. Ele também dá suporte a propriedades e efeitos não lineares, como elasticidade, cargas flutuantes, massas e materiais diferente (ANSYS, 2013).

A diferença dos dois tipos de elementos utilizados é demonstrada na Fig. (4.2), pode-se perceber que para o elemento de BEAM 188 é assumido sempre a forma linear, sobrepondo elementos no interior da curva e deixando vazios na parte externa da curva. Já no elemento *BEAM 189* não ocorre tais aproximações.

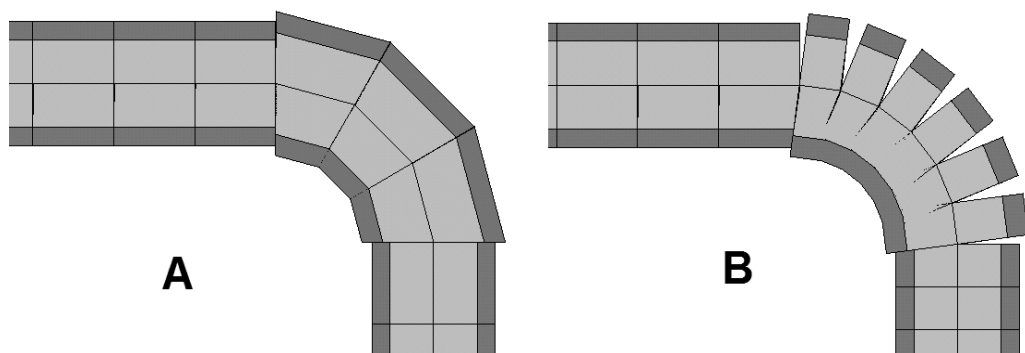


Figura 4.2 – Elemento *BEAM 189* (A) com a forma elementar quadrática e BEAM 188 (B) com a forma elementar linear. (ANSYS)

4.3.4. Análise do elemento

Conforme Cyrino (1989), a maioria das estratégias para obter malhas eficientes estão no enriquecimento de malhas já especificada. Os principais meios de enriquecimento são os *refinamentos h* e *p*. O *refinamento h* é responsável por aumentar a quantidade de elementos deixando a ordem do polinômio constante. O *refinamento p* é responsável por aumentar a ordem do polinômio sem alterar o número de elementos, conforme a Fig. (4.3).

O refinamento tipo *h* ou *hp* deve ser utilizado com atenção pelo analista, ao aumentar o número de elementos ou a ordem dos elementos de um sistema buscando aproximar a solução exata, aumenta também o custo computacional, essa é a desvantagem, pois requer mais tempo e mais investimento computacional (PACHECO & SHZU, 2016).

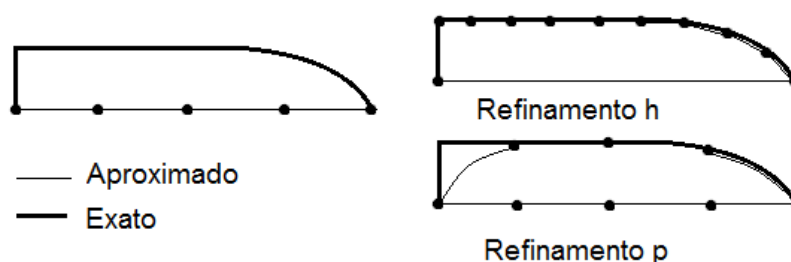


Figura 4.3 – Exemplificação dos tipos de refinamento. Refinamento *h* altera a quantidade de elementos. Refinamento *p* altera a ordem do polinômio. (AUTOR)

Partindo de um tamanho “Default” existente no ANSYS® foi-se alterando a quantidade de elementos e comparando os resultados. Esta análise é relevante quando se analisa o valor computacional e a convergência dos resultados, como mostra a Tab. (4.1).

Tabela 4.1 – Relação de mudança com tamanho do elemento em um ponto escolhido (Autor).

Malha	Quantidade de elementos	Tensão Max (Pa)	Deslocamento Max (m)
1	266 (Default)	$1,0092 \times 10^6$	0,016504
2	440	$1,0092 \times 10^6$	0,016504
3	841	$1,0072 \times 10^6$	0,016473
4	4046	$1,0071 \times 10^6$	0,016471

A malha escolhida será a malha Default, demonstrada na Tab. (4.1) como malha 1. Ela foi selecionada, pois a variação é baixa com o aumento de elementos.

Foram aumentados a quantidade de elementos em 15 vezes e o deslocamento foi alterado em 0,2 %. Conforme a Fig. (4.4);

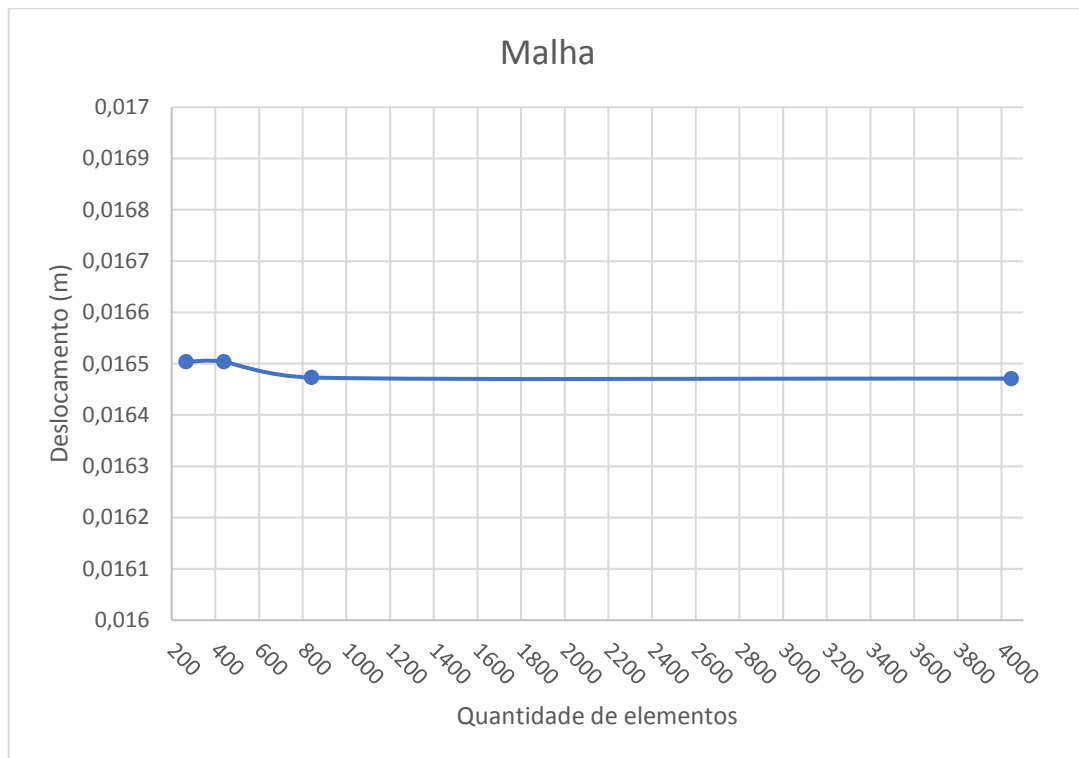


Figura 4.4 – Variação do deslocamento com aumento de elementos (AUTOR).

5. MÉTODO EXPERIMENTAL

A análise pelo MEF, quando realizada de forma errada, pode não representar a realidade. É sugestivo então realizar, sempre que possível, experimentos procurando comprovar os resultados obtidos numericamente (WEIS & PINTO, 2016).

Os experimentos realizados no presente trabalho têm como objetivo validar o modelo numérico utilizado. A coleta de dados, as características físicas e as etapas de montagem, são benefícios que podem ser avaliados através do experimento, porém se o intuito é apenas análise, pode não ser sugestivo, pois requer tempo para construção e para futuras alterações.

Para realizar o experimento necessita a utilização de uma bancada, onde fixa-se o chassi que serve de base para a aplicação dos esforços. Esta certifica a repetitividade nos diferentes tipos de experimento, tornando-os confiáveis.

5.1. ESTRUTURA DIDÁTICA

A estrutura didática, chassi, foi utilizada como ponto de partida para a elaboração do trabalho de Alba (2015) e será utilizada para fornecer as dimensões e realizar o experimento do presente trabalho. Essa estrutura pode ser vista na Fig. (1.1), na pág. (1).

Os motivos para construção da estrutura didática com tubos e conexões comerciais de PVC foram:

- (I) Facilidade de encontrar as partes que o compõe;
- (II) Facilidade de montagem;
- (III) Utilização de ferramental barato para construção;
- (IV) Preço dos materiais;

Com tais benefício a construção foi realizada seguindo o manual de colagem da Tigre, presente no Anexo II, como Catálogo Tigre®. O chassi teve o objetivo de integrar a prática ao conhecimento adquirido.

O tipo de chassi foi escolhido como escada, com inúmeros benefícios e aplicação em veículos de carga e transporte coletivo, este atrai um estudo mais abrangente. Sua aplicação não restringe a veículos automotores rodoviários, podendo ser aplicados a veículos sobre trilhos ou de tração animal, como trens e charretes, respectivamente.

5.2. BANCADA

A bancada foi construída para suportar e transmitir os esforços do experimento à estrutura didática. O primeiro passo foi decidir quais simulações deveriam ser realizados e quais esforços a estrutura deveria suportar.

Conforme mostrado na seção anterior foram realizados dois tipos de ensaio, o ensaio de flexão e o ensaio de torção. Os esforços realizados na estrutura didática deverão ser aplicados pela bancada, sendo assim a bancada deverá resistir aos esforços de reação.

A geometria da bancada foi definida pelas seguintes requisitos:

- (i) Ser de fácil fabricação;
- (ii) Ser rígida aos esforços de reação;
- (iii) Ser de fácil manejo, podendo alterar com facilidade os ensaios;

Assim, foram escolhidos para a confecção da bancada o perfil retangular, Tab. (5.1), pela facilidade de fabricação, atendendo o primeiro requisito. As dimensões do perfil foram escolhidas de modo a obter maior rigidez e para permitir vários arranjos de ensaio foram construídas partes móveis parafusadas.

Após definida a geometria da bancada foi realizado a análise no programa. No ensaio de torção a tensão máxima na bancada foi de 7,68 MPa e o deslocamento máximo foi de 0,224 mm. Para o ensaio de flexão a tensão máxima na bancada foi de 2,60 MPa e o deslocamento máximo foi de 0,044 mm.

Como foram utilizados perfis de aço, as tensões máximas obtidas numericamente não extrapolam a tensão do material. De acordo com Callister & Rethwisch (2016) o Limite de resistência a tração do ferro é 262 MPa, sendo 30 vezes maior ao resistido pela bancada. A figura (5.1) mostra a bancada utilizada no experimento.

Tabela 5.1 – Dimensões do perfil de bancada (AUTOR).

	Medida (mm)
Largura	30
Altura	50
Largura da chapa	1,2



Figura 5.1 – Bancada construída para ser utilizada no experimento (AUTOR).

5.3. ATUADOR PNEUMÁTICO

Inicialmente o atuador pneumático seria o Sheffer 2AA1, porém com o intervalo disponível de pressão a carga exercida era superior ao desejado no projeto. Foi então fornecido pela faculdade dois atuadores da festo, as dimensões estão no Anexo (V). Ao realizar alguns testes com a célula de carga foi constatado instabilidade em um dos atuadores, permanecendo útil apenas um. O teste está no Anexo X.

O responsável por realizar as forças na estrutura foi o atuador pneumático da Festo DSNU-12-125-P-A. Os motivos da escolha é:

- (i) Trabalha dentro do intervalo de pressão fornecido pela linha pneumática;
- (ii) Fornece o intervalo força desejada no experimento;
- (iii) Possui bom comportamento mecânico de funcionamento;
- (iv) Comprimento da haste é satisfatório;

Inicialmente os atuadores foram testados, a força dos atuadores foi calculada, de forma analítica, através da equação (5.1) e foi comparada com a força retirada de forma experimental.

$$F = P * A \quad (5.1)$$

Onde P é a pressão do fluido (ar), F é a força e A é a área do embolo. Como os atuadores são cilíndricos, a área será calculada através das equações (5.2):

$$A = \pi R^2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.2)$$

Onde R e D é, respectivamente, o raio e o diâmetro do embolo e r e d é respectivamente o raio e o diâmetro do eixo.

Para a realização do teste foram utilizados os seguintes equipamentos:

- (i) Célula de carga de modelo não definido (Patrimônio 277922);
- (ii) Dispositivo indicador Eletrônico Digital DPL-06
- (iii) Regulador de pressão Festo (LR-D-MIDI)
- (iv) Manômetro analógico Festo (356 759 XO)
- (v) Válvula direcional Festo Eletropneumática
- (vi) Compressor de ar

O intervalo de pressão aplicada no experimento, do atuador pneumático, foi definido pelo intervalo de funcionamento de todos os equipamentos sendo de 2 a 9 bar. Partindo desse requisito foram definidas três pressões, 2,2, 5,2 e 8,2 bar. A Tabela (5.2) relaciona a força obtida pelo teste com a analítica.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio do Atuador Pneumático.

Teste				Analítico	
Pressão (bar)		Carga(kg)	Força (N)	Força (N)	Erro (%)
2,2 ± 0,1	Avanço	2,48 ± 0,04	24,32 ± 0,39	24,88 ± 1,13	2,22
	Recuo	1,40 ± 0,07	13,68 ± 0,71	18,66 ± 0,85	26,66
5,2 ± 0,1	Avanço	5,90 ± 0,09	57,79 ± 0,85	58,81 ± 1,13	1,58
	Recuo	3,86 ± 0,05	37,86 ± 0,48	44,10 ± 0,85	14,26
8,2 ± 0,1	Avanço	9,14 ± 0,06	89,65 ± 0,55	92,73 ± 1,13	3,31
	Recuo	6,14 ± 0,09	60,22 ± 0,85	69,55 ± 0,85	14,47

A visualização dos valores analíticos com os valores obtidos através do teste do atuador pode ser melhor visualizado na Fig. (5.2).

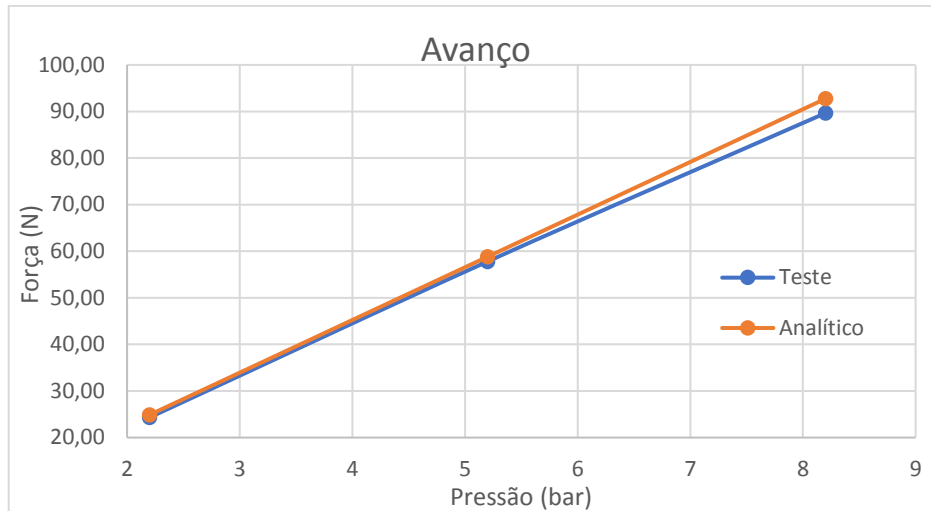


Figura 5.2 – Comparação da força de avanço através do teste e analítico (AUTOR).

Pode-se visualizar a comparação no recuo do atuador através da Fig. (5.3) mostrada a seguir.

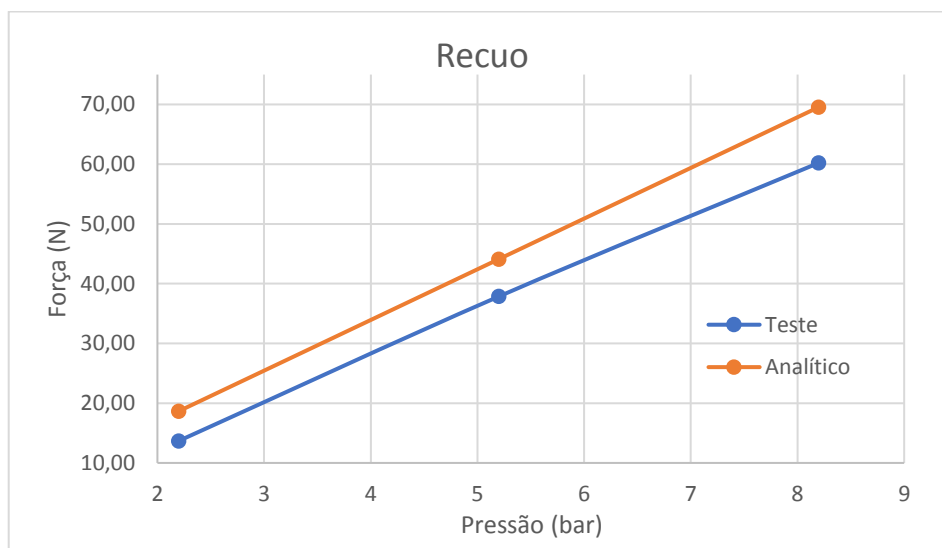


Figura 5.3 – Comparação da força de recuo através do teste e analítico (AUTOR).

Como pode-se observar a diferença no recuo do atuador tem intensidade influenciável, baseado nessa variação, será admitido as forças obtidas no ensaio do atuador.

5.4. INSTRUMENTO DE MEDIÇÕES

Inicialmente a ideia era utilizar o equipamento de medição NAJA CELETTE® disponível na faculdade, esse equipamento é utilizado para conferir e ajustar carrocerias ou chassis avariados. No entanto para estruturas pequenas, como no

caso, o erro de leitura é bastante significativo. O equipamento mostrado na Fig. (5.4) não utilizado.



Figura 5.4 – Equipamento disponível, porém não utilizado (RAE, 2018).

Posteriormente foi cogitado a utilização do relógio comparador, porém a faixa de medição é de apenas 100 mm, assim para o ensaio de torção os deslocamentos extrapolam tornando não atrativo o uso. Outro fator que impediu o uso foi a quantidade, pois quando fixado em um ponto não pode ser transferido para outro.

As medições foram realizadas através do calibrador traçador de altura mecânico DIGIMESS, ele tem capacidade de medição de 0-300 mm, resolução de 0,01 mm. Para o presente trabalho é o melhor instrumento, pois, pode ser utilizado em diferentes pontos com apenas um instrumento. Mostrado na Fig. (5.5).



Figura 5.5 – Equipamento utilizado (TECNO, 2018).

No instrumento o intervalo compreendido entre o menor e o maior valor do instrumento de medição é conhecido como Faixa de indicação. A Faixa de medição ou intervalo de medição é a faixa determinada confiável pelo fabricante, ela em equipamentos analógicos pode coincidir com a Faixa de indicação ou ser inferior.

O valor de uma divisão é a diferença entre duas marcas sucessivas em um equipamento analógico, nos equipamentos digitais ele é a menor medida incremental (incremento digital). A resolução é a menor indicação percebível, para equipamentos digitais ela iguala ao incremento digital, para os equipamentos analógicos ela representa a metade do valor de uma divisão (NETO Et al, 2001).

O equipamento de medida utilizado funciona como o paquímetro, ele utiliza o método da comparação, pois compara a medida padrão do instrumento com o mensurando (NETO Et al., 2001).

5.5. MÉTODO DE MEDIDA

O erro está implícito na medida, não é possível medir sem cometer algum tipo de erro; o sistema de medição, o operador, o ambiente, a medida de grandeza influencia na medição. A medição, contudo, é afetada por estes erros, combinados ou não, então é necessário que haja uma análise dos erros para que as informações retiradas sejam confiáveis (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

No presente trabalho foi utilizado a distribuição t de *student*. Ela foi desenvolvida por William Sealey Gosset no fim do século XIX em seu emprego. A ideia de William era relacionar a quantidade de dados com a confiabilidade, adicionando um peso ao desvio-padrão (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

O Desvio padrão é a medida do grau de dispersão aleatório, é utilizado para fazer um intervalo em torno da média. Conforme a distribuição normal 66,6% dos resultados estão no intervalo de $\bar{x} - s$ a $\bar{x} + s$ (NETO Et.al., 2001).

Será escolhida distribuição em que 95,45% dos elementos estejam na curva, para distribuição normal com infinitos pontos o intervalo seria $\bar{x} \pm 2s$, porém, para amostras pequenas esse intervalo pode não ser eficiente, assim utilizou a distribuição *student*. No Anexo (XI) há três curvas t student com 2, 6 e 50 graus de liberdade, demonstrando que para número de amostras finito pode assemelhar a curva normal, onde é considerado número de amostra total. Para o presente trabalho, foram obtidas seis e três medições, ou seja, cinco e dois graus de liberdade, respectivamente.

A média aritmética é a soma de todos os valores de toda a amostra, dividido pela quantidade total de indivíduos. Portanto, se há uma quantidade infinita de elemento não há como realizar a média aritmética, apenas a média amostral. A média amostral (\bar{x}) será utilizada no presente trabalho e ela pode ser calculada pela equação (5.4)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5.4)$$

Onde o \bar{x} é a média de N elementos da amostra.

O desvio da amostra (d_i) pode ser calculado pela Eq. (6.5). pode ser calculada através da equação (6.6) e o

$$d_i = x_i - \bar{x} \quad (5.5)$$

A variância amostral (s^2) pode ser calculada à partir da Eq. (5.6)

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N d_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.6)$$

O desvio padrão amostral (s) através da Eq. (5.7)

$$s = \sqrt{s^2} \quad (5.7)$$

Graus de liberdade pode ser calculado pela Eq. (5.8)

$$\nu = N - 1 \quad (5.8)$$

Para a distribuição *student* pode-se calcular a repetitividade, Re , de acordo com a Eq. (5.9)

$$Re = \pm t \cdot u \quad (5.9)$$

Onde u é a incerteza-padrão da amostra e é calculada como o desvio-padrão da amostra. (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008)

Considera-se o equipamento de medição como calibrado e adota que a resolução (R) seja o erro máximo, pode-se escrever como a real medida (RM) conforme a Eq. (5.10)

$$RM = \bar{x} \pm (Re + R) \quad (5.10)$$

5.6. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

O experimento foi montado conforme a Fig. (5.6).



Figura 5.6 – (1) Demarcação da posição da bancada. (2) Demarcação das posições do traçador de altura. (3) Atuador pneumático no experimento de torção (Autor).

Pode-se notar que na Fig. (5.6) estão apontadas as setas que indicam a posição da bancada, que dá suporte ao chassi didático, e também os lugares onde o traçador de altura foi posicionado para realizar a medição no chassi e o atuador pneumático.

Então foram seguidas as seguintes etapas para a montagem:

- (I) Montagem do chassi na bancada;
- (II) Posicionamento da bancada de modo a não haver balanço com o solo;
- (III) Montagem do circuito pneumático;
- (IV) Regulagem da pressão (2,2, 5,2 ou 8,2 bar)
- (V) Montagem do atuador pneumático, posicionando na marca do ensaio de Flexão ou Torção;

- (VI) Demarcação do lugar onde a bancada está;
- (VII) Demarcação dos lugares onde o traçador de altura terá que ficar
- (VIII) Medição de todos os pontos antes da aplicação da carga;
- (IX) Aplicação da carga, nessa etapa é necessário aguardar até que o atuador estabilize a pressão na linha e a estrutura acomode;
- (X) Leitura dos deslocamentos através do traçador de altura;
- (XI) No fim deve realizar a desmontagem da linha pneumática e desmontagem do atuador, guardando-os em seus devidos lugares.

O experimento assim como a simulação numérica foi analisado de duas maneiras, flexão e torção. Na flexão será aplicado uma carga no meio do chassi, como mostrado na Fig. (5.7). As medidas dos deslocamentos serão retiradas dos pontos indicados como 1 e 2.

Para o ensaio de torção será aplicado um momento na parte da frente do chassi e será retirado o deslocamento nos pontos 3 e 4, como mostrado na Fig. (5.8).

Para realização do experimento foram retiradas seis (6) medições para a pressão de 2,2 bar e três (3) medições para as pressões de 5,2 e 8,2 bar, como demonstrado no Anexo IX.

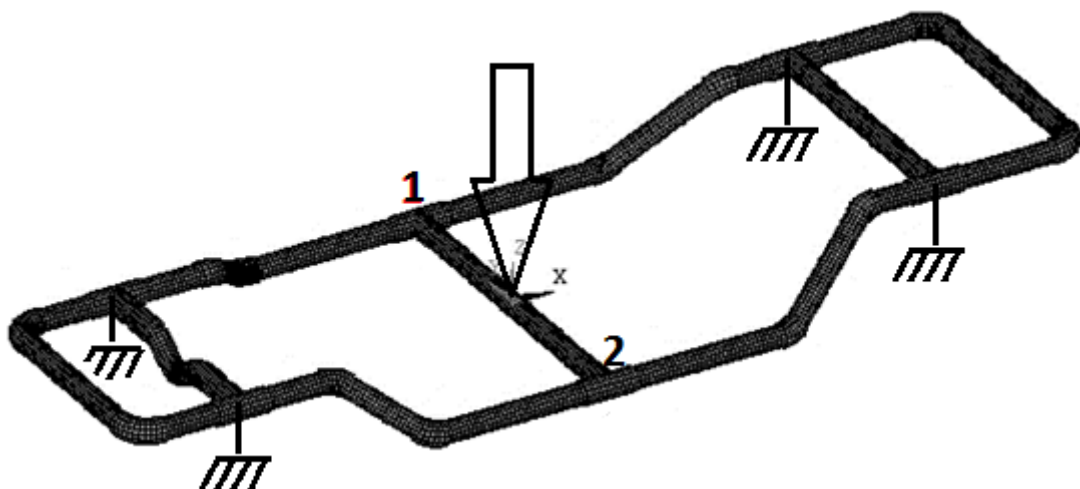


Figura 5.7 – Pontos onde serão medidos os deslocamentos e ponto onde será aplicado a força (ANSYS – modificada).

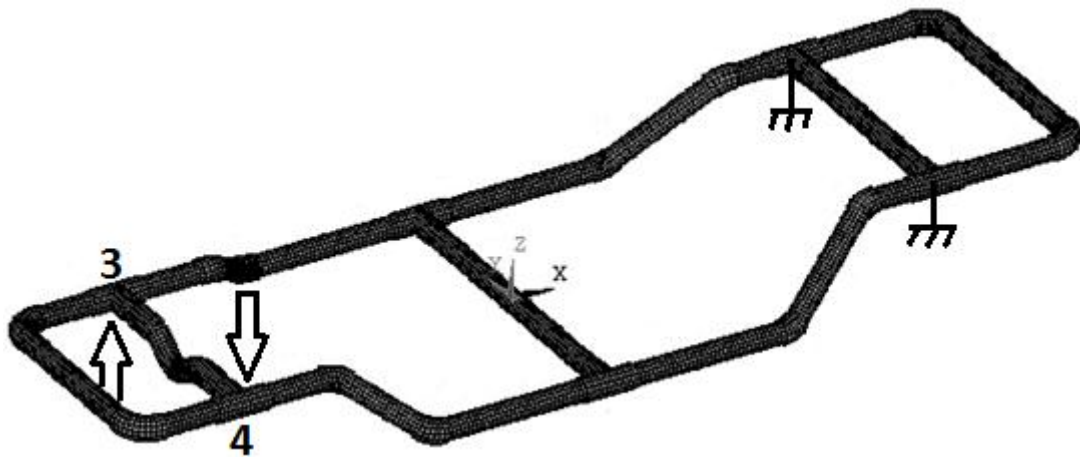


Figura 5.8 – Pontos onde serão aplicadas as forças e serão medidos os deslocamentos na torção (ANSYS – Modificada).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do experimento estão na Tab. (6.1), neles estão indicadas as médias e a repetitividade somado à resolução do equipamento. Os valores foram retirados do experimento e todos os dados estão fornecidos no Anexo IX.

Ensaio	Força/ Momento	Deslocamento (mm)							
		1		2		3		4	
		\bar{x}	Erro	\bar{x}	Erro	\bar{x}	Erro	\bar{x}	Erro
Flexão	15,75 N	2,49	0,85	1,99	0,67	-		-	
	39,89 N	6,53	0,69	5,13	1,47	-		-	
	62,25 N	8,87	0,69	7,57	0,60	-		-	
Torção	6,20 Nm	-		-		7,12	0,87	-7,02	0,34
	14,76 Nm	-		-		16,58	1,51	-16,61	1,48
	22,86 Nm	-		-		16,61	0,74	-26,26	0,78

Tabela 6.1 – Resultados do experimento da estrutura didática (AUTOR).

O coeficiente t da distribuição *student* foi retirado do Albertazzi & Sousa (2008). A tabela (6.2) mostra os resultados obtidos através da simulação numérica.

Tabela 6.2 – Deslocamentos em “z” na simulação numérica (AUTOR).

Ensaio	Força/ Momento	Deslocamento (mm)			
		1	2	3	4
Flexão	15,75 N	1,761	1,761	-	-
	39,89 N	4,447	4,447	-	-
	62,25 N	6,925	6,925	-	-
Torção	6,20 Nm	-	-	8,425	-8,745
	14,76 Nm	-	-	19,298	-21,061
	22,86 Nm	-	-	28,586	-32,646

Estão representados nas Fig. (6.1) e (6.2) os gráficos de flexão e torção, respectivamente. Neles estão contidos a relação dos dados obtidos por experimento e simulação numérica.

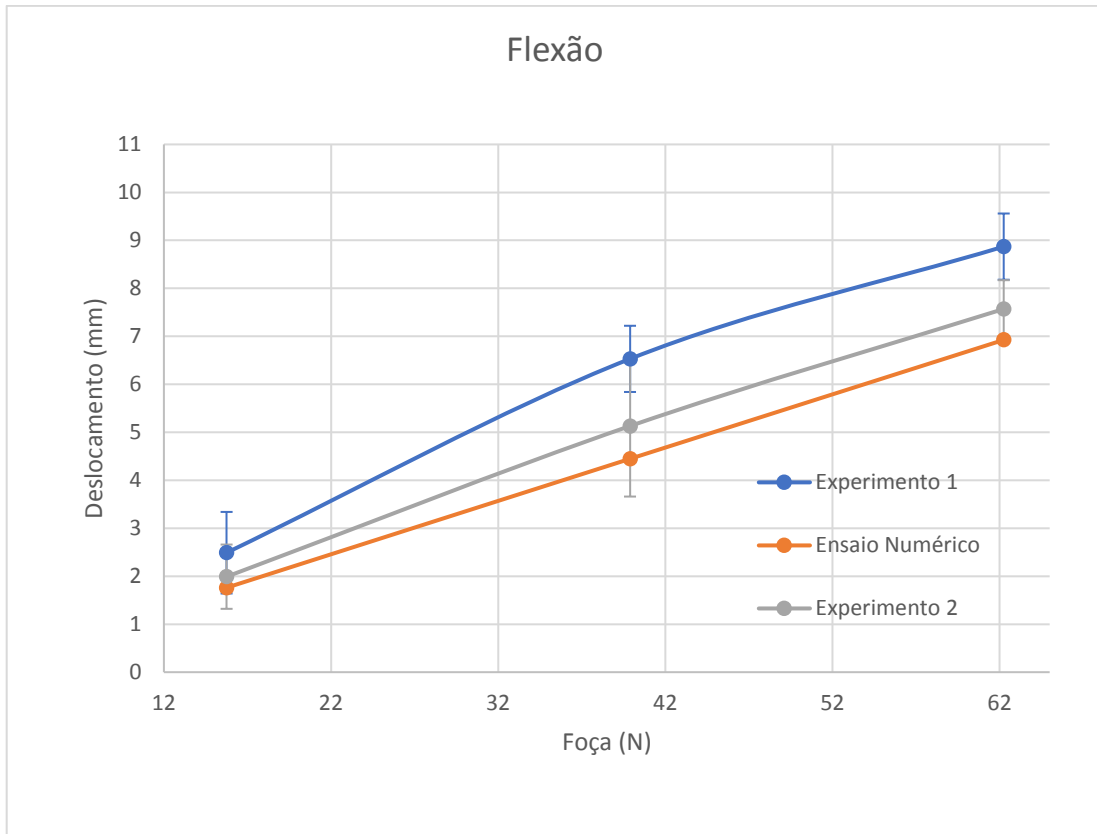


Figura 6.1 – Relação dos deslocamentos no ponto 1 e 2 do experimento com o deslocamento calculado na simulação numérica (AUTOR).

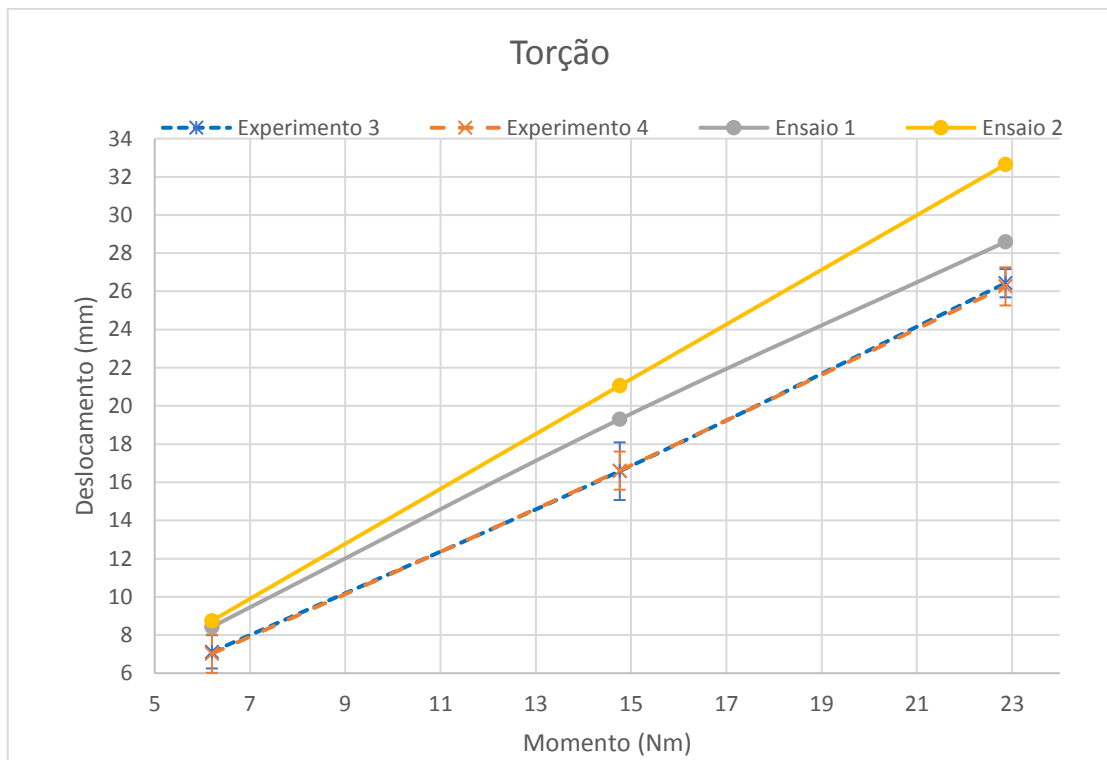


Figura 6.2 – Relação dos deslocamentos no ponto 3 e 4 do experimento com o deslocamento calculado na simulação numérica (AUTOR).

Os valores de flexão podem ser comparados diretamente, já para a comparação da torção será necessário calcular os ângulos através da Eq. (2.2). A comparação do ensaio de flexão será apresentada na Tab. (6.3). A Equação (6.2) foi utilizada para calcular o erro relativo ER , onde é inserido os valores experimentais como verdadeiros.

$$ER = \frac{|Valor\ Experimental - Valor\ Numérico|}{Valor\ Experimental} \times 100 \quad (6.2)$$

Tabela 6.3 – Erros experimentais para o ensaio de flexão (AUTOR).

Ensaio	$ER_f(\%)$
Flexão 1	20,39
Flexão 2	25,30
Flexão 3	15,22

Os erros encontrados para o ensaio de flexão são valores altos, as causas serão apresentadas após relação dos valores de torção.

Para encontrar a rigidez torcional numérica, K_{tn} , basta relacionar os valores encontrados na Tab. (6.2). Os valores encontrados na Tab. (6.4) foram retirados através da Eq. (2.1).

Tabela 6.4 – Rigidez à torção para simulação numérica (AUTOR).

$\Delta z/L$	$\sin^{-1}(\Delta z/L) (^{\circ})$	Torque (Nm)	$K_{tn}(Nm/^{\circ})$
0,064	3,646	6,2	1,70
0,149	8,597	14,76	1,72
0,227	13,108	22,86	1,74

Para encontrar a rigidez Torcional experimental, K_{te} , pode-se utilizar a Eq. (2.1). Para calcular a incerteza será utilizado a Eq. (6.3), os cálculos foram desenvolvidos e estão presentes no Anexo VIII.

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial X_1} \right| u(X_1) + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial X_n} \right| u(X_n) \quad (6.3)$$

A Tabela (6.5) mostra os valores da rigidez torcional experimental, K_{te} , e suas incertezas.

Tabela 6.5 – Rigidez à torção para Experimento (AUTOR).

$\Delta z/L$	$\sin^{-1}(\Delta z/L)$ (°)	Torque (Nm)	$K_{te}(Nm/^\circ)$	$u(K_{te})(Nm/^\circ)$
0,0523	3,002	6,2	2,065	0,0867
0,1229	7,060	14,76	2,091	0,0892
0,1951	11,253	22,86	2,032	0,0284

Pode-se observar, na Fig. (6.3), a relação da rigidez torcional obtida no experimento e na simulação numérica

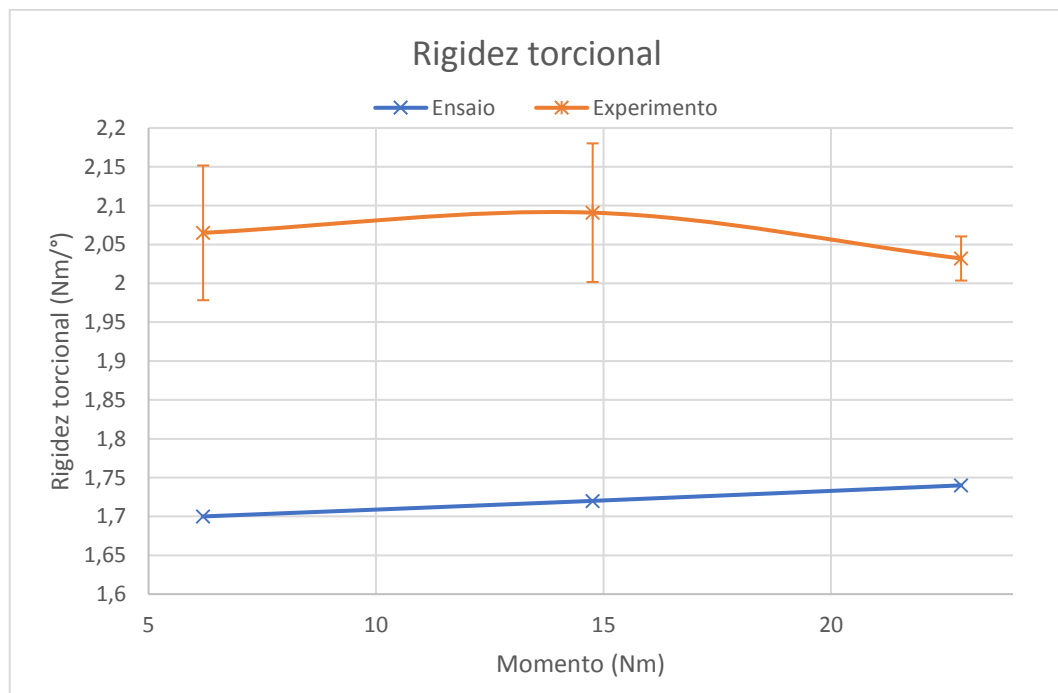


Figura 6.3 – Relação da rigidez torcional (AUTOR).

Assim pode-se utilizar os valores e calcular o erro relativo, ER , da simulação numérica em relação ao experimento. Utilizou a Eq. (6.2) para obter os valores da Tab. (6.6)

Tabela 6.6 – Erro Relativo (AUTOR).

Ensaio	$ER_t(\%)$
Torção 1	17,66
Torção 2	17,88
Torção 3	14,15

Após analisar a rigidez torcional nota-se que a o valor obtido pelo experimento é maior do que o valor obtido pela simulação numérica, portanto ao analisar o

deslocamento sofrido na flexão, diferenciou o raciocínio, para esclarecer foi realizado a Tab. (6.7) e Tab. (6.8) onde relacionam as forças com os deslocamentos, assemelhando à uma rigidez à flexão.

Tabela 6.7 – Relação da força com deslocamento no Experimento (AUTOR).

Força (N)	Desl. 1 (mm)	Desl. 2 (mm)	Média (mm)	Rigidez(N/mm)
15,75	2,49	1,99	2,24	7,03
39,89	6,53	5,13	5,83	6,84
62,25	8,87	7,57	8,22	7,57

Tabela 6.8 – Relação da força com deslocamento no ensaio de flexão(AUTOR).

Força(N)	Média(mm)	Rigidez (N/mm)
15,75	1,761	8,944
39,89	4,447	8,970
62,25	6,925	8,989

Pode-se então fazer uma relação com a rigidez encontrada na flexão e a rigidez encontrada na torção, a Fig. (6.4) apresenta os valores da rigidez de ambos os tipos de experimentos.

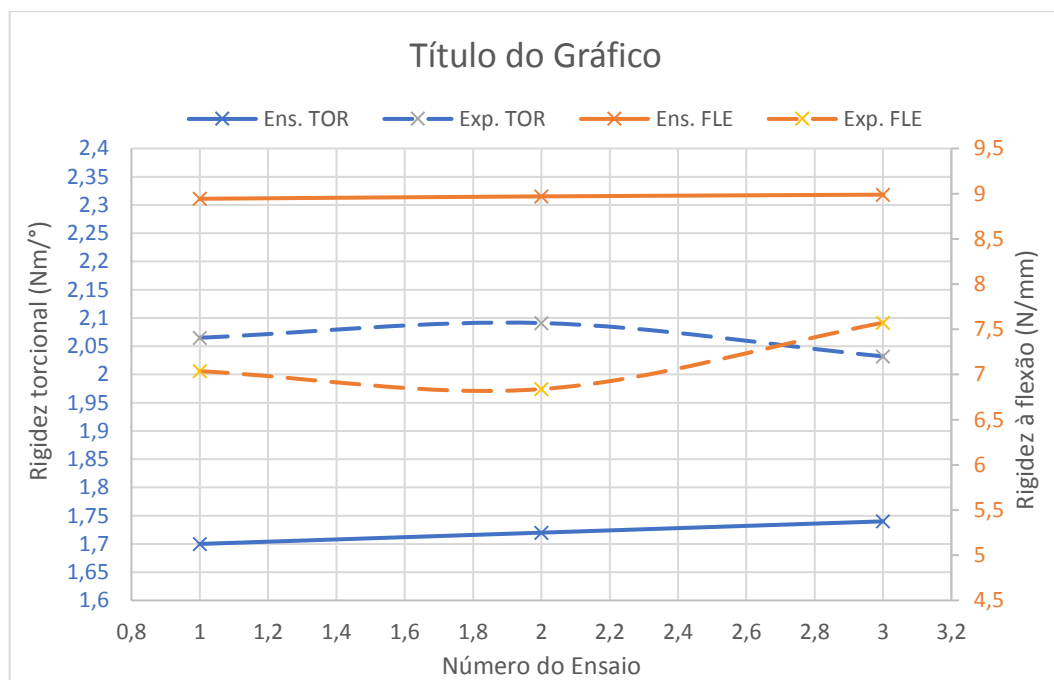


Figura 6.4 – Relação da Rigidez no experimento à torção e à flexão. No eixo primário (esquerda) estão os valores da rigidez à torção e no eixo secundário (direita) estão os valores da rigidez à flexão. As curvas contínuas são obtidas por simulação e as tracejadas são por experimento (AUTOR).

Nota-se, na torção, que a rigidez na simulação é inferior ao experimento, já na flexão a rigidez é superior ao experimento. Para torção esse resultado era esperado, pois foi selecionado um módulo de elasticidade mínimo, ou seja, a variação do tubo com adição de carga poderia ser o maior possível.

Porém, na flexão, os resultados foram contraditórios a esse raciocínio, como foi aplicado ao material módulo de elasticidade mínimo esperar-se-ia deslocamentos, na simulação, com valores superiores aos deslocamentos experimentais. O primeiro passo para descobrir tal erro foi revisar as simulações numéricas a fim de encontrar divergências.

No ensaio à flexão foram revisados os apoios, restringindo apenas os movimentos que são impedidos pela bancada, porém não surtiu efeitos e os resultados continuaram os mesmos.

Nota-se que os valores dos erros relativos são altos, os fatores que os influenciam podem ser de origem do modelo numérico, ou do experimento.

Os possíveis fatores de originados na simulação numérica são:

- (I) Modelo pode não estar condizente com o experimental; nas conexões foram consideradas junções perfeitas, ignorando pequenas curvas. Para resolver, seria necessário remodelar o chassi, tornando mais detalhado.
- (II) Diferença do módulo de elasticidade real com o adquirido das bibliografias. Seria necessário realizar como no trabalho de Souza (2015), ensaios experimentais a fim de encontrar o módulo de elasticidade do tubo utilizado.
- (III) Tipo de elemento; o elemento foi justificado pelo trabalho de Alba Et. al (2015), porém foram realizadas análises, em seu trabalho, relacionando apenas ensaios numéricos.
- (IV) Foi considerado o chassi totalmente simétrico, desconsiderando empenos após a montagem.

Os possíveis fatores originados do experimento são:

- (I) Medições erradas; uma fonte de erro pode ser o operador. Foram ignoradas as informações como umidade e temperatura do local, podendo para tal material utilizado alterar as propriedades mecânicas;
- (II) O erro de leitura, pois o equipamento ficou em uma posição baixa.
- (III) Utilização de material que não é destinado a aplicação estrutural;

- (IV) Falhas na montagem da estrutura didática: podendo deixar lugares mais rígidos com excesso de cola e outros mais fracos pela falta.
- (V) Assumido propriedades mecânicas constantes em todo o material e igual para tubos e conexões;
- (VI) Efeitos como Histerese foram desconsiderados a fim de facilitar a modelagem numérica.
- (VII) Realização do experimento em lugar não apropriado: seria muito dispendioso encontrar um laboratório com piso apropriado, linha pneumática disponível e ambiente estabilizado;
- (VIII) Seria necessário uma mesa de mármore plana para diminuir a interferência do meio, porém não havia perto da linha pneumática.
- (IX) Atritos interno do atuador pneumático foram considerados constantes em todo seu percurso, foi analisado apenas grande diferença de atrito no avanço e recuo.
- (X) A montagem do chassi foi realizada sobre uma mesa plana de mármore Fig. (1.1), porém ainda há empenamento, deixando a estrutura assimétrica.
- (XI) Influência da bancada; mesmo ela tendo mais de 30 vezes a rigidez do chassi é possível que ela interfira nas medições.
- (XII) Interferência dos suportes; não foram na simulação considerados apoios com tal dimensão.

7. CONCLUSÃO

O objetivo foi comparar dois tipos de análise, numérica e experimental. Inicialmente foi considerado módulo de elasticidade mínimo dentre os disponíveis na literatura.

Nota-se que a rigidez torcional atendeu as expectativas de erro, sendo, na simulação, inferior a obtida experimentalmente. Porém na flexão não houve mesmo raciocínio, os resultados não foram satisfatórios, os motivos foram apresentados, porém, a simplificação no desenho das conexões é relevante

Os motivos de tais divergências podem ser inúmeros, como mostrado no capítulo 6. Mas para realizar um trabalho de forma numérica é necessário compreender o conjunto, observando como os detalhes tem influência.

Os erros relativos foram altos, porém admitindo que o módulo de elasticidade seja o principal fator, estes erros são aceitáveis. Para uma melhor comparação seria necessária uma análise específica do material utilizado, obtendo as propriedades reais.

A modelagem do trabalho foi incentivada por alguns fatores, disponibilidade de ferramentas foi um dos principais. Nota-se que a alteração do ensaio numérico é fácil, detonando a vasta utilização. Já no experimento, para realizar uma alteração, como houve dos atuadores, é necessário investimento superior.

O comportamento do chassi pode ser analisado, mesmo com valores divergentes, sendo assim esta ferramenta se torna útil para aperfeiçoar estruturas, colocando reforços onde necessário e retirando onde não necessita. Isso torna o investimento iniciado por software lucrativo.

Na torção o modelo numérico foi condizente, os valores dos erros relativos foram altos, porém é conhecida a fonte de tal erro. Já no ensaio de flexão o modelo numérico não foi satisfatório, os resultados foram opostos ao esperado.

8. TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos e dando continuidade ao trabalho, pode-se direcionar os estudos às propriedades mecânicas do PVC, a fim de obter as características reais. É indicado também simular em outro software a fim de comparar com o experimento.

Baseado no ensaio de torção, pode-se alterar o módulo de elasticidade ou encontrá-lo através de experimento e aplicá-lo na modelagem numérica, com o intuito de diminuir o erro relativo.

Para o ensaio de flexão seria conveniente utilizar outro modelo matemático, sendo assim, desenvolver um modelo mais consistente.

Pode-se realizar um estudo com intuito de aumentar a rigidez do chassi ou diminuir a massa do mesmo mantendo a rigidez encontrada.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBA, M. H. M.; AGUIAR, L. R. C.; CAS, J. L. K.; RIBEIRO, A. S.; DAHER, S. L.; KHALIL, S. B.; SHZU, M. A. M.; **“Análise Estrutural de um Modelo em Escala Reduzida de Chassi Automotivo pelo Método dos Elementos Finitos”**. In: VII ENCONTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA FACULDADE UNB GAMA, 2015, Gama/Brasília. Anais do VII ENCONTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA FACULDADE UNB GAMA, 2015.
- ALBERTAZZI JR, A. G.; SOUSA, A. R. de; **“Fundamentos de Metrologia Científica e industrial”** Ed. Manole. 2008.
- ANFAVEA; Disponível em < <http://www.anfavea.com.br/anuarios.html>>. Acessado em abril de 2017.
- ASSAN, A E.; **“Método dos elementos finitos: primeiros passos”**. 2 ed. Campinas, São Paulo; Editora da Unicamp, 2003.
- CARDILE, E.; **“ON THE FAST TRACK Ferrari pushes the limits of simulation in improving aerodynamic performance of racing cars”**. Ansys Advantage, Vol. VII, Issue 3, 2003 pg. 32-35.
- CARROANTIGO. **“História do Carro Brasileiro”**. Disponível em http://www.carroantigo.com/portugues/indice_ccal.htm . Acessado em abril de 2017.
- CHANDRA, M. R., SRINIVASULU, S., HUSSAIN, S. T., **“Modeling and Structural Analysis of Heavy Vehicle Chassis Made of Polymeric Composite Material by Three Different Cross Sections”**, Journal of Mechanical and Production Trans Stellar, Vol.2, Issue.4, July-Aug. 2012 pg. 2594-2600.
- COSTA, P. G.; **“A Bíblia do Carro”**. Livro digital. 2001. Disponível em <http://mecatronicaegaragem.blogspot.com.br/2011/06/biblia-do-carro.html>. Acessado em abril de 17.
- CYRINO, J. C. R.; **“Convergência Acelerada Pela Relocalização De Nós E Refinamento De Malhas De Elementos Finitos”** Tese para título de Doutor em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.
- DISMA CATÁLOGO; **“Catálogo Disma”**. Disponível em < <http://www.dismaferramentas.com.br/site2011/catalogo/default.asp?busca=&marca=DISMA&categoria=6&pagina=12.pdf>>. Acessado em maio de 2017.
- ENDEAVOR; **“5 dúvidas básicas sobre fazer um protótipo para seu negócio”**. Endeavor Brasil 2015. Disponível em <https://endeavor.org.br/prototipo/>. Acessado em abril de 2017.
- FISH, Jacob, BELYTSCHKO, Ted. **“Um Primeiro Curso em Elementos Finitos”**. LTC, 07/2009. [Minha Biblioteca]. Disponível em < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/978-85-216-1941-3>>. Acessado em Maio 2018.

- FILHO, Avelino Alves. **“Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE”**, 6th edição. Érica, 06/2013. [Minha Biblioteca]. Disponível em < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788536519708>>. Acessado em Maio de 2018.
- FURTADO, D. C; ÁVILA S. M., **“Análise Estrutural de Chassi de Veículos Automotivos”**. Dissertação para título de graduação de Engenharia Automotiva, Faculdade UnB Gama, Brasília, 2013.
- GILLESPIE, T. D. **“Fundamentals of Vehicle Dynamics”**, Society of Automotive Engineers Inc., USA, 1992.
- GORNI, A. A.; **“Introdução à Prototipagem Rápida e Seus Processos”**. Revista Plástico Industrial, pág. 230-239. 2001. Disponível em < <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>>. Acessado em abril de 2017.
- GUEDES, B., FILKAUSKAS, M. E., **“O Plástico”**, São Paulo: Érica, 1986
- INOVAR-AUTO; Disponível em < http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/login.jsp?_adf.ctrl-state=v6viwa74_29>. Acessado em abril de 2017.
- Jr., CALLISTER, William D., RETHWISCH, David G. **“Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução”**, 9ª edição. LTC, 07/2016. [Minha Biblioteca].
- KIM, Nam-Ho, SANKAR, Bhavani V. **“Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos”**. LTC, 01/2011. [Minha Biblioteca]. Disponível em < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/978-85-216-1959-8>>. Aessado em Junho de 2018.
- LIVESEY W. A., ROBINSON A., **“Repair of Vehicle Bodies”**, 5ª Ed. Linacre House, Jordan Hill, Oxford, UK: Butterwoth-Heinemann. 2005.
- MANO, E. B., MENDES, L. C., **“Introdução a Polímeros”**, 2ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2004.
- MANO, E. B., **“Polímeros como materiais de engenharia”**, São Paulo: Edgard Blucher. 1991
- MORAES, A. J.; **“O Método dos Elementos Finitos e a Engenharia Civil”**, Revista On-Line IPOG, Dezembro de 2015, Instituto do Pós-Graduação, IPOG, Cuiabá-MT, 2015. Disponível em < <https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n10-2015/o-metodo-dos-elementos-finitos-e-a-engenharia-civil/>>. Acessado em abril de 2017.
- MÜLLER, G.; **“Engineering Applications of ANSYS® Inside Siemens AG”**. ANSYS® Incorporated. Erlangen, Germany 2002. Disponível em < http://www.auc-ev.de/fileadmin/ANSYS_in_DACH-und-Geschichte/wp_siemens.pdf>. Acessado em Abril de 2017.
- NETO, B. de B.; SCARMINIO I. S.; BRUNS, R. E.; **“COMO FAZER EXPERIMENTOS: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria”** 2 ed. Campinas, São Paulo, Editora Unicamp, 2001.

- NOVOTNY, A. A.; FANCELLO, E. A.; **“Um refinamento h , p e hp adaptativo na análise de flexão de placas semi-espessas”**. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol 14,1. Pág 25-48. 1998.
- NUNES, L. R., RODOLFO JÚNIOR, A., ORMANJI, W., HAGE JÚNIOR, E., AGNELLI, J. A. M., PESSAN, L. A., **“Tecnologia do PVC”**. 2 ed. São Paulo: ProEditores/Braskem. 2006.
- OLIVEIRA, A. de; **“A Relação de Santos Dumont Com O Primeiro Veículo De São Paulo”**. 2015. Disponível em <http://www.saopauloinfoco.com.br/a-relacao-de-santos-dumont-com-o-primeiro-veiculo-de-sao-paulo/>. Acessado em abril de 17.
- OLIVEIRA, F. C. G. de; **“Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica”**, Dissertação para obtenção do título de Pós-Graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- OLMO F. J. V., MARINATO C. S., GADIOLI A. O., SILVA R. V. da; **“Construção de modelo didático para o ensino de biologia: meiose e variabilidade genética”**, Enciclopédia Biosfera, v. 10, n. 10, Pag. 3569-3575, Centro Científico Conhecer – Goiânia. 2014.
- PACHECO, G.; SHZU, M. A. M.; **“Análise Numérica e Experimental Em Placa De Material Compósito De Aplicação Na Indústria Automotiva”**. Dissertação para título de graduação em Engenharia Automotiva, Faculdade UnB Gama, Brasília, 2016.
- RAE; **“RAE Service”**. 2018. Disponível em <https://www.raeservice.com/product/naja-3d-measuring-system/>. Acessado em Julho de 2018.
- REYNOL, A.; **“Modelagem e simulação de micromisturadores”**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-24092008-141009/pt-br.php>>. Acesso em Maio de 2017.
- REZENDE, V.; **“O Método de Galerkin”**. Dissertação para título de mestre em Ciências. Departamento de matemática da Universidade de Maringá, Maringá. 2005.
- SANTOS JR. J. B., MARCONDES M. E. R.; **“Identificando os modelos didáticos de um grupo de professores de química”**, Revista Ensaio, v.12, n. 03, p. 101-116, Belo Horizonte. 2010.
- SILVA, J. G. S. da; SOEIRO. F. J. da C. P.; VELLASCO, P. C. G. da S.; GUIMARÃES, L. P.; VELOZO, L. T.; **“Uma experiência acadêmica nos cursos de graduação da Faculdade de Engenharia da UERJ a partir da utilização do programa ANSYS”** Cobenge, Pág. 96-105, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

- SILVA, J. G. S. DA, SOEIRO, F. J. DA C. P., TRIGUEIRO, G. S., ROBERTO, M. A. R., “**Análise estrutural de chassi de veículos pesados com base no emprego do programa ANSYS**”, Cobenge, Pág. 88-95, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2001.
- SOARES, F. S., GERTZ, L. C., CERVIERI, A., AIRES, A. F. R., SILVEIRA, M. A. da, “**Desenvolvimento de um chassis automotivo para um veículo elétrico de pequeno porte**”, Revista de Iniciação científica de ULBRA, Pág. 93-101, Nº 10/2012.
- SORIANO, H. L.; LIMA, S. de S.; “**Métodos de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**”. 48ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- SORIANO, H. L.; “**Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas**”, Ciência Moderna, São Paulo, 2009.
- SOUZA, L. R. DA S.; “**Desenvolvimento de Estrutura Veicular do tipo Space Frame Construída com Tubos de PVC**”. Dissertação para título de Mestrado na Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional (profissional), Catalão, 2015.
- TECNO Loja Digital; “**Tecno ferramentas**”. 2018. Disponível em < https://www.tecnoferramentas.com.br/calibrador-tracador-de-altura-mecanico-capacidade-0_300-mm-digimess-100430/p?idsku=2000106&gclid=Cj0KCQjwvezZBRDkARIsADKQyPkdtxuU6LsvL7n0Kxjs3OaY47hjQAdi_L487NxxOgfnuikn8znCeAoaAuQ4EALw_wcB>. Acessado em julho de 2018.
- TEÓFILO J. “**Estrutura e Propriedades dos Materiais**”, Apostila, Cap. 9 – Ensaios Mecânicos dos Materiais. 2010. Disponível em < <https://jorgeteofilo.wordpress.com/> >. Acessado em maio de 18.
- TEDESCO, G. M. I. et al. “**Mercado de Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil**.” Revista ANTT, v. 3, n. 2, p. 140-51, 2011.
- TOMAZ, P.; “**Livro conservação da água**”, Cap. 9 – Cargas em tubos de PVC. Livro digital, Curso de manejo de águas pluviais. 2010. Disponível em < http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/livro_conservacao/capitulo9.pdf>. Acessado em abril de 17.
- WAKEHAM, K. J., “**Introdution To Chassis Design – Revision 1.0**”. Mechanical Engineerign Undergraduate, Memorial University of Newfoundland And Labrador, Newfoundland And Labrador, Canada, 2009.
- WEIS, G. H. E.; PINTO F. A. de N. C.; “**Análise Computacional E Experimental De Rigidez À Torção De Um Chassi De Fórmula Sae**” Dissertação para título de graduação de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

10. ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Dimensões dos Tubos e Conexões	57
Anexo II	Catálogo Tigre® (Montagem)	59
Anexo III	Roteiro numérico	60
Anexo IV	Dimensões do cilindro pneumático	65
Anexo V	Tabela de medições experimentais	66
Anexo VI	Cotas Chassi	67
Anexo VII	Cotas da Bancada	68

I. Anexo - Dimensões dos Tubos e Conexões

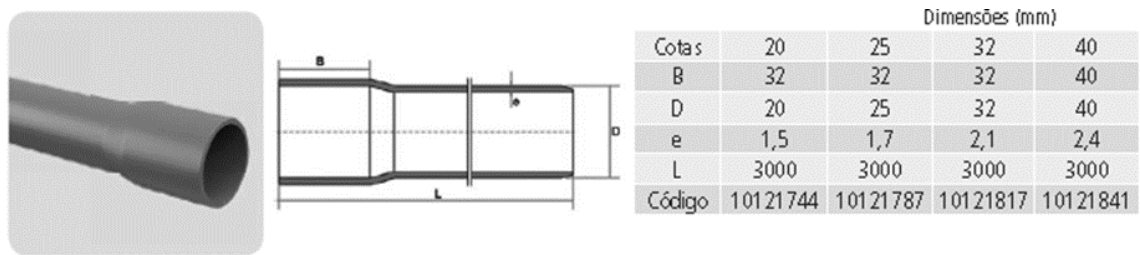


Figura A.1.1 – Dimensões do tubo de PVC soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

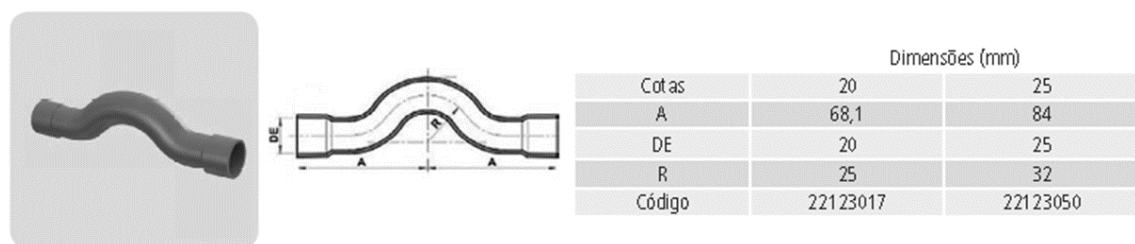


Figura A.1.2 – Curva tipo transposição soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

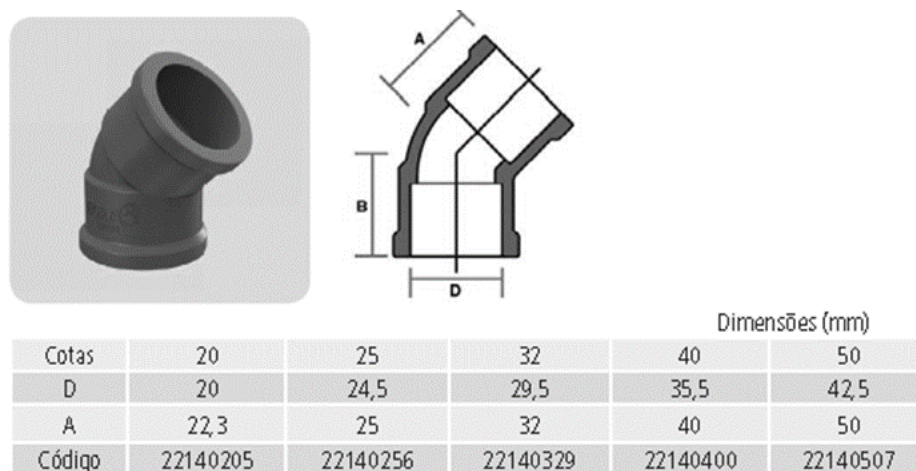


Figura A.1.3 – Joelho de 45° soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

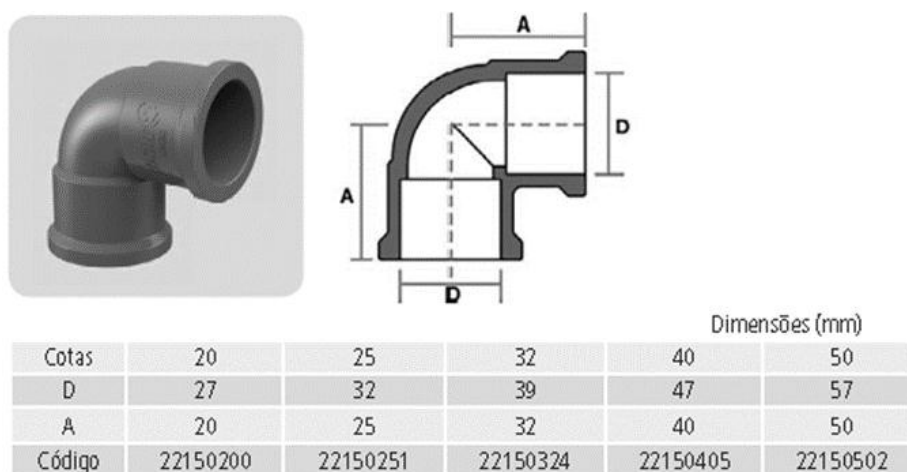


Figura A.1.4 – Joelho de 90° soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

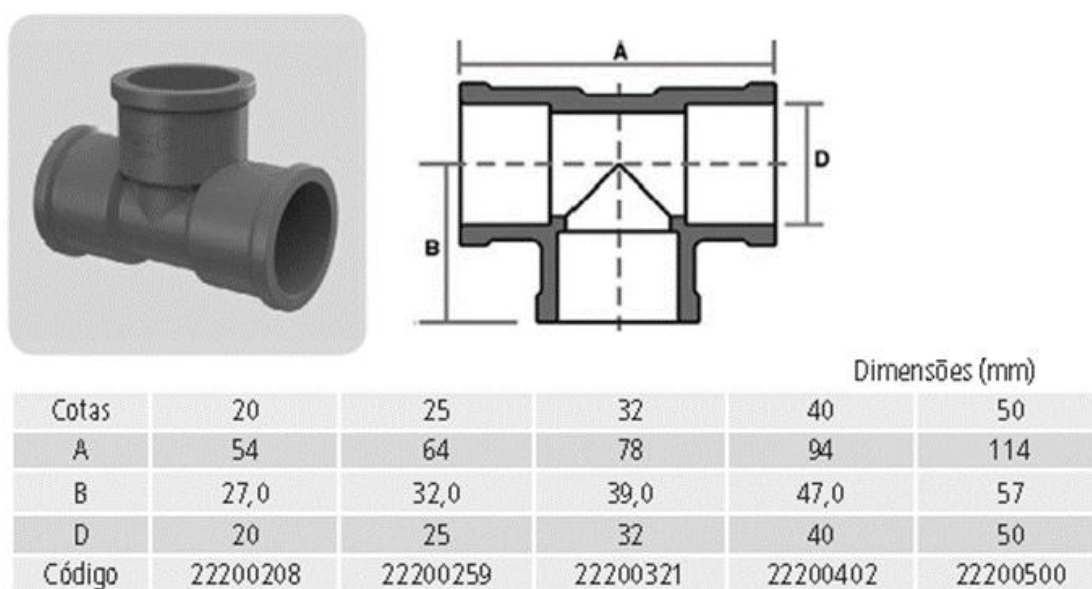


Figura A.1.5 – Tê soldável. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

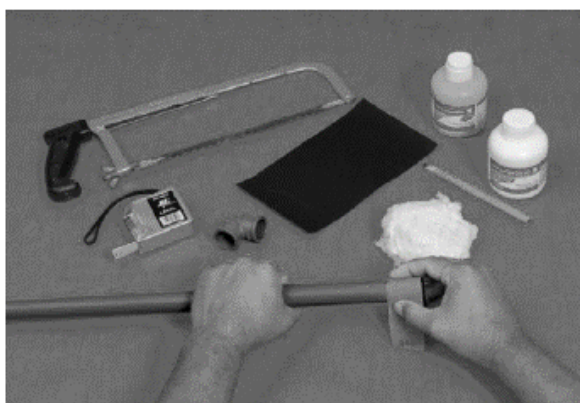
II. Anexo – Catálogo Tigre® (Montagem)

Água Fria
Soldável



Execução das Juntas Soldáveis

Passo 1: Corte o tubo no esquadro e lixe as superfícies a serem soldadas. Observe que o encaixe deve ser bastante justo, quase impraticável sem o adesivo, pois sem pressão não se estabelece a soldagem.



Passo 2: Limpe as superfícies lixadas com Solução Preparadora TIGRE, eliminando impurezas e gorduras.



Passo 3: Distribua uniformemente o adesivo com um pincel ou com o bico da própria bisnaga nas bolsas e nas pontas a serem soldadas. Evite excesso de adesivo.



Passo 4: Encaixe de uma vez as extremidades a serem soldadas, promovendo, enquanto encaixar, um leve movimento de rotação de 1/4 de volta entre as peças, até que estas atinjam a posição definitiva. Remova o excesso de adesivo e espere 1 hora para encher a tubulação de água e 12 horas para fazer o teste de pressão.



Figura A.2.1 – Passos para montagem das conexões. (CATÁLOGO TIGRE, 2016)

III. Anexo – Roteiro numérico do chassi

FINISH	!escolha das seção do tubo
/CLEAR	ISECTYPE(1) = NÚMERO DE IDENTIFICAÇÃO
	ISECTYPE(2) = TIPO DO ELEMENTO
!Título	ISECTYPE(3) = TIPO DA SEÇÃO DO ELEMENTO
/title, TCC-Marcos	ISECTYPE(4) = NOME DA SEÇÃO
/filemame, TCC-Marcos	ISECTYPE(5) = GRAU DE REFINAMENTO(0~5)
!-----	SECTYPE,1,BEAM,CTUBE,TUBO,3
!-----Pré-processamento-----	!Dimensões do raio interno e externo do tubo e
!-----	!divisões
	SECDATA,0.0108,0.0125,15
!Variáveis	!Plotando
!Densidade em kg/m ³	SECPLOT,1,1
d = 1450	
!Módulo de elasticidade 2.5 Gpa	
E = 2500000000	!escolha das seção das conexões
! Coeficiente de Poisson	SECTYPE,2,BEAM,CTUBE,CONEXOES,3
p = 0.38	!Dimensões do raio interno e externo das juntas
	SECDATA,0.0108,0.0145,15
!Iniciando o tipo de Pré-processamento	!Plotando
/PREP7	SECPLOT,2,1
! Visualização dos elementos discretizados	!Definindo os keypoints:
/ESHAPE,1	k,001, 0.000,-0.205,0.00
	k,002, 0.230,-0.205,0.00
!Escolha do Elemento	k,003, 0.350,-0.155,0.10
ET,1,BEAM189	k,004, 0.440,-0.155,0.10
	k,005, 0.620,-0.155,0.10
!Incluindo uma deflexão em larga escala	k,006, 0.620, 0.155,0.10
NLGEOM,ON	k,007, 0.440, 0.155,0.10
	k,008, 0.350, 0.155,0.10
!Graus de liberdade conforme o BEAM189	k,009, 0.230, 0.205,0.00
!KEYOPT,(1),(2),(3),(4)	k,010, 0.000, 0.205,0.00
!KEYOPT(1) = 1; 6 graus de Liberdade mais	k,011,-0.220, 0.205,0.00
!envergadura	k,012,-0.300, 0.135,0.06
!KEYOPT(2) = 1; Assume Seção rígida	k,013,-0.420, 0.135,0.06
!KEYOPT(4) = 2; Mostra um estado combinado de	k,014,-0.550, 0.135,0.06
!cisalhamento (Torção e flexão)	k,015,-0.550,-0.135,0.06
	k,016,-0.420,-0.135,0.06
KEYOPT,1,1,,2	k,017,-0.300,-0.135,0.06
	k,018,-0.220,-0.205,0.00
!Propriedades do Material	k,071, 0.408, 0.155,0.10
!Módulo de Elasticidade	k,072, 0.472, 0.155,0.10
MP,EX,1,E	k,073, 0.440, 0.123,0.10
!Densidade	k,041, 0.408,-0.155,0.10
MP,DENS,1,d	k,042, 0.472,-0.155,0.10
!Coeficiente de Poisson	k,043, 0.440,-0.123,0.10
MP,PRXY,p	k,131,-0.452, 0.135,0.06
	k,132,-0.388, 0.135,0.06
	k,133,-0.420, 0.103,0.06

k,134,-0.420, 0.084,0.06
 k,135,-0.420, 0.042,0.06
 k,110,-0.032,-0.205,0.00
 k,120, 0.032,-0.205,0.00
 k,130, 0.000,-0.173,0.00
 k,101,-0.032, 0.205,0.00
 k,102, 0.032, 0.205,0.00
 k,103, 0.000, 0.173,0.00
 k,161,-0.452,-0.135,0.06
 k,162,-0.388,-0.135,0.06
 k,163,-0.420,-0.103,0.06
 k,164,-0.420,-0.084,0.06
 k,165,-0.420,-0.042,0.06
 k,106,-0.420, 0.000,0.028

!Linhas ligando o keypoints

L,001,120
 L,120,002
 L,002,003
 L,003,041
 L,041,004
 L,004,042
 L,042,005
 L,005,006
 L,006,072
 L,072,007
 L,007,071
 L,071,008
 L,008,009
 L,009,102
 L,102,010
 L,010,101
 L,101,011
 L,011,012
 L,012,132
 L,132,013
 L,013,131
 L,131,014
 L,014,015
 L,015,161
 L,161,016
 L,016,162
 L,162,017
 L,017,018
 L,018,110
 L,110,001
 L,001,130
 L,130,103
 L,103,010
 L,004,043
 L,043,073
 L,073,007

L,016,163
 L,133,013
 L,133,134
 L,134,135
 L,135,106
 L,163,164
 L,164,165
 L,165,106

!linhas curvas para os cantos

LFILLT,02,03,0.032
 LFILLT,03,04,0.032
 LFILLT,07,08,0.032
 LFILLT,08,09,0.032
 LFILLT,12,13,0.032
 LFILLT,13,14,0.032
 LFILLT,17,18,0.032
 LFILLT,18,19,0.032
 LFILLT,22,23,0.032
 LFILLT,23,24,0.032
 LFILLT,27,28,0.032
 LFILLT,28,29,0.032
 LFILLT,40,41,0.032
 LFILLT,41,44,0.032
 LFILLT,43,44,0.032

!Selecionando as linhas com SECTYPE1-TUBOS

!LSEL(1)= Selecciona(S), Adiciona(A)

!LSEL(4)= Linha inicial

!LSEL(5)= Linha final

LSEL,S,,,02,04

LSEL,A,,,07,09

LSEL,A,,,12,14

LSEL,A,,,17,19

LSEL,A,,,22,24

LSEL,A,,,27,29

LSEL,A,,,02,04

LSEL,A,,,32,32

LSEL,A,,,35,35

LSEL,A,,,57,59

LSEL,A,,,41,42

LSEL,A,,,44,44

LSEL,A,,,39,39

!Fazendo a discretização dos tubos

!Se não for apresentado é admitido um

!tamanho padrão

!LESIZE(1)= Selecciona a linha, ou todas linhas
 !seleccionadas (ALL)
 !LESIZE(2)= Tamanho da linha
 LESIZE,ALL,0.005

!Criando a malha
 !Seleccionando o ,Material,Real,type,,,,Section
 !TYPE é definido no ET
 LATT,1,1,1,,,,1

!Seleccionando as linhas com SECTYPE2-CONEXÕES
 LSEL,S,,,01,01
 LSEL,A,,,30,31
 LSEL,A,,,45,46
 LSEL,A,,,05,06
 LSEL,A,,,33,34
 LSEL,A,,,47,48
 LSEL,A,,,36,38
 LSEL,A,,,10,11
 LSEL,A,,,15,16
 LSEL,A,,,20,21
 LSEL,A,,,25,26
 LSEL,A,,,51,54
 LSEL,A,,,20,21
 LSEL,A,,,55,56
 LSEL,A,,,40,40
 LSEL,A,,,43,43
 LSEL,A,,,49,50

!Fazendo a discretização das Conexões
 LESIZE,ALL,0.005

!Criando a malha
 !Seleccionando o ,Material,Real,,,,,
 LATT,1,1,1,,,,2

!Reseleccionando todas as linhas
 LSEL,ALL
 !Gerando os elementos de linha discretizados
 LMESH,ALL

!-----
 !-----FLEXÃO-----
 !-----

FINISH
 /SOL

!Aplicando as restrições para ensaio de Flexão
 !DK(1)= Nó em que será restringido
 !DK(2)= Tipo de restrição

DK,04,ALL
 DK,07,ALL
 DK,13,ALL
 DK,16,ALL

!Aplicando forças no meio para ensaio de Flexão
 !FK(1)= Nó em que será aplicado a força
 !FK(2)= Direção da força
 !FK(3)= Magnitude da força

FK,01,FZ,-70
 FK,10,FZ,-70

!Aplicando a aceleração da gravidade.
 !ACEL(1)= Na direção X
 !ACEL(2)= Na direção Y
 !ACEL(3)= Na direção Z

ACEL,,,9.81

!Apresentando o status do Programa

/STATUS

!Iniciando a Solução

SOLVE
!SE ESCOLHER ESSE VÁ PARA O PÓS-PROC.

!-----
 !-----TORÇÃO-----
 !-----

FINISH
 /SOL

!Aplicando as restrições para ensaio de Torção
 !DK(1)= Nó em que será restringido
 !DK(2)= Tipo de restrição

DK,07,ALL
 DK,16,ALL

!Aplicando forças no meio para ensaio de Torção
 !FK(1)= Nó em que será aplicado a força
 !FK(2)= Direção da força
 !FK(3)= Magnitude da força

FK,04,FZ,-30
 FK,13,FZ,30

!Aplicando a aceleração da gravidade.
 !ACEL(1)= Na direção X
 !ACEL(2)= Na direção Y
 !ACEL(3)= Na direção Z

ACEL,,,9.81

!Apresentando o Estados do Programa

!/STATUS

!Iniciando a Solução

SOLVE
ISE ESCOLHER ESSE VÁ PARA O PÓS-PROC.

!-----
 !-----Pós-processamento -----
 !-----

!Insere os dados de resultado no
 !Pósprocessamento

/POST1

!Define o conjunto de dados a ser lido a partir dos
 !resultados

SET,FIRST

!-----Tensões-----

!Plotagem das Tensões
 /EFACET,1

!Plota os esforços
 PLESOL,S,EQV,1,1.0
 !Lista os esforços
 PRESOL,s,COMP

!-----Deformações-----

!Plota os Deslocamentos
 PLNSOL,U,Z,0,1.0
 !Lista os Deslocamentos
 PRNSOL,U

IV. Anexo - Roteiro numérico da bancada

FINISH	!Propriedades do Material
/CLEAR	!Módulo de Elasticidade
	MP,EX,1,E
!Título	!Densidade
/title, Bancada	MP,DENS,1,d
/filename, Bancada-Marcos	!Coeficiente de Poisson
	MP,PRXY,p
!-----	
!-----Pré-processamento-----	!escolha das seção do tubo
!-----	ISECTYPE(1) = NÚMERO DE IDENTIFICAÇÃO
	ISECTYPE(2) = TIPO DO ELEMENTO
!Variáveis	ISECTYPE(3) = TIPO DA SEÇÃO DO ELEMENTO
!Densidade em kg/m ³	ISECTYPE(4) = NOME DA SEÇÃO
d = 8000	ISECTYPE(5) = GRAU DE REFINAMENTO(0~5)
!Módulo de elasticidade 210 Gpa	
E = 210000000000	SECTYPE,1,BEAM,HREC,METALON,3
! Coeficiente de Poisson	
p = 0.38	!Dimensões (Para HREC)
!Largura do Perfil quadrado (30 mm)	ISECDATA(1) = largura
l = 0.030	ISECDATA(2) = Altura
!Altura do perfil quadrado (50 mm)	ISECDATA(3) = Espessura da direita
a = 0.050	ISECDATA(4) = Espessura da Esquerda
!Largura da chapa (1,2 mm)	ISECDATA(5) = Espessura de baixo
t = 0.0012	ISECDATA(6) = espessura de Cima
	SECDATA,l,a,t,t,t,t
!Iniciando o tipo de Pré-processamento	
/PREP7	!Plotando
	SECPLOT,1,1
! Visualização dos elementos discretizados	
/ESHAPE,1	SECTYPE,2,BEAM,L,CANTONEIRA,3
	!Dimensões (Para L)
!Escolha do Elemento	ISECDATA(1) = LARGURA
ET,1,BEAM189	ISECDATA(2) = ALTURA
	ISECDATA(3) = Espessura da LARGURA
!Incluindo uma deflexão em larga escala	ISECDATA(4) = EspESSURA DA ALTURA
NLGEOM,ON	SECDATA, 0.0254,0.0254,0.003175,0.003175
!Graus de liberdade conforme o BEAM189	!Plotando
!KEYOPT,(1),(2),(3),(4)	SECPLOT,2,1
!KEYOPT(1) = 1; 6 graus de Liberdade mais	!Definindo os keypoints:
envergadura	k,01, 0.000,-0.265,0.00
!KEYOPT(2) = 1; Assume Seção rígida	k,02, 0.440,-0.265,0.00
!KEYOPT(4) = 2; Mostra um estado combinado de	k,92, 0.440,-0.155,0.00
cisalhamento (Torção e flexão)	k,03, 0.495,-0.265,0.00
	k,04, 0.495, 0.000,0.00
KEYOPT,1,1,,2	k,05, 0.495, 0.265,0.00

k,06, 0.440, 0.265,0.00
 k,96, 0.440, 0.155,0.00
 k,07, 0.000, 0.265,0.00
 k,98,-0.435, 0.265,0.00
 k,09,-0.475, 0.265,0.00
 k,10,-0.475, 0.000,0.00
 k,11,-0.475,-0.265,0.00
 k,12,-0.435,-0.265,0.00
 k,93,-0.435, 0.000,0.00
 k,94, 0.000, 0.000,0.00
 k,15, 0.440, 0.000,0.00

k,82, 0.440,-0.155,0.300
 k,86, 0.440, 0.155,0.300
 k,88,-0.435, 0.265,0.300
 k,83,-0.435, 0.000,0.300
 k,84, 0.000, 0.000,0.300

!Linha ligando os Keypoints

L,11,3
 L,1,7
 L,2,6
 L,3,5
 L,5,9
 L,98,12
 L,9,11

L,82,92
 L,86,96
 L,88,98
 L,83,93
 L,84,94

!Selecionando as linhas
 LSEL,S,,,01,07

!LESIZE(1)= Selecciona a linha, ou todas linhas
 !seleccionadas (ALL)
 !LESIZE(2)= Tamanho da linha
 LESIZE,ALL,0.01

!Criando a malha
 !Selecionando o ,Material,Real,type,,,,Section
 !TYPE é definido no ET
 LATT,1,1,1,,,,1
 !Gerando os elementos de linha discretizados
 LMESH,ALL

!-----

!Selecionando as linhas

LSEL,S,,,08,12

!LESIZE(1)= Selecciona a linha, ou todas linhas
 !seleccionadas (ALL)

!LESIZE(2)= Tamanho da linha
 LESIZE,ALL,0.01

!Criando a malha
 !Selecionando o ,Material,Real,type,,,,Section
 !TYPE é definido no ET
 LATT,1,1,1,,,,2
 !Gerando os elementos de linha discretizados
 LMESH,ALL

!Ligando os elementos e nós do sistema
 NUMMRG,ALL, , , ,LOW
 !NUMMRG,NODE, , , ,LOW

!-----
 !-----TORÇÃO-----
 !-----

FINISH
 /SOL

!Aplicando as restrições para ensaio de Flexão
 !DK(1)= Nó em que será restringido
 !DK(2)= Tipo de restrição

Dk,82,ALL
 Dk,83,UY,,,,UZ,ROTY,ROTZ
 Dk,86,ALL

!Aplicando forças no meio para ensaio de Flexão
 !FK(1)= Nó em que será aplicado a força
 !FK(2)= Direção da força
 !FK(3)= Magnitude da força

FK,88,FZ,-90

!Aplicando a aceleração da gravidade.
 !ACEL(1)= Na direção X
 !ACEL(2)= Na direção Y
 !ACEL(3)= Na direção Z

!ACEL,,,9.81

!Apresentando o status do Programa

/STATUS

!Iniciando a Solução

SOLVE

ISE ESCOLHER ESSE VÁ PARA O PÓS-PROC.

!-----
!-----FLEXÃO-----
!-----

FINISH

/SOL

!Aplicando as restrições para ensaio de Flexão

!DK(1)= Nó em que será restringido

!DK(2)= Tipo de restrição

Dk,82,ALL

Dk,83,UY,,,,UZ,ROTY,ROTZ

Dk,86,ALL

!Aplicando forças no meio para ensaio de Flexão

!FK(1)= Nó em que será aplicado a força

!FK(2)= Direção da força

!FK(3)= Magnitude da força

FK,84,FZ,62.25

!Aplicando a aceleração da gravidade.

!ACEL(1)= Na direção X

!ACEL(2)= Na direção Y

!ACEL(3)= Na direção Z

!ACEL,,,9.81

!Apresentando o status do Programa

/STATUS

!Iniciando a Solução

SOLVE

ISE ESCOLHER ESSE VÁ PARA O PÓS-PROC.

!-----
!-----Pós-processamento -----
!-----

!Insere os dados de resultado no

!Pósprocessamento

/POST1

!Define o conjunto de dados a ser lido a partir dos

!resultados

SET,FIRST

!-----Tensões-----

!Plotagem das Tensões

/EFACET,1

!Plota os esforços

PLESOL,S,EQV,1,1.0

!Lista os esforços

PRESOL,s,COMP

!-----Deformações-----

!Plota os Deslocamentos

PLNSOL,U,Z,0,1.0

!Lista os Deslocamentos

PRNSOL,U,Z

V. Anexo – Dimensões do Atuador Pneumático

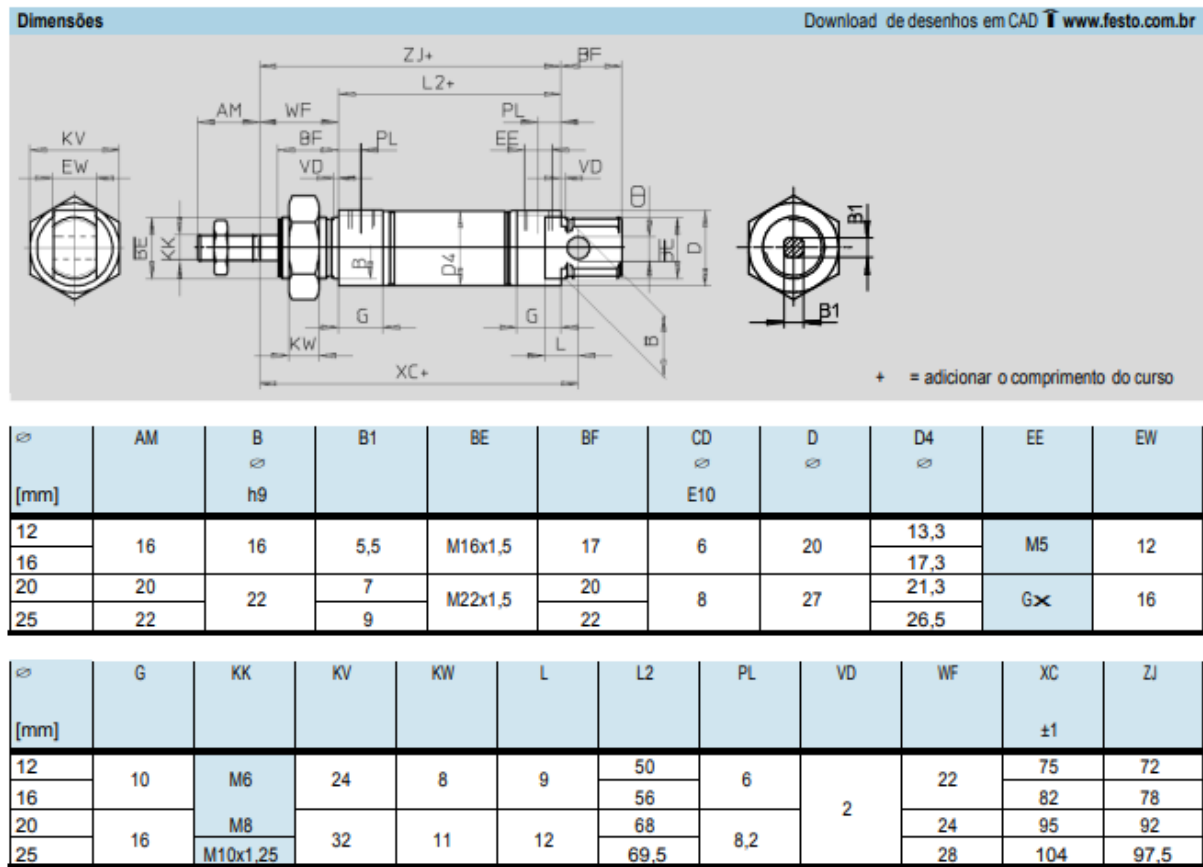
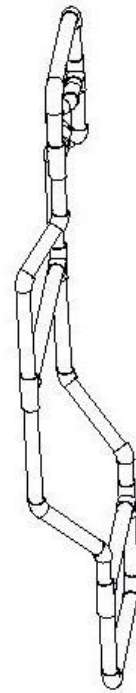
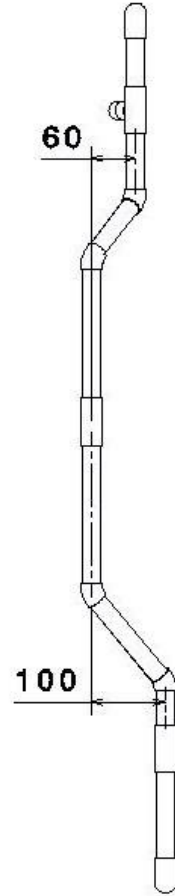
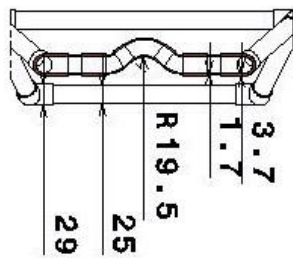
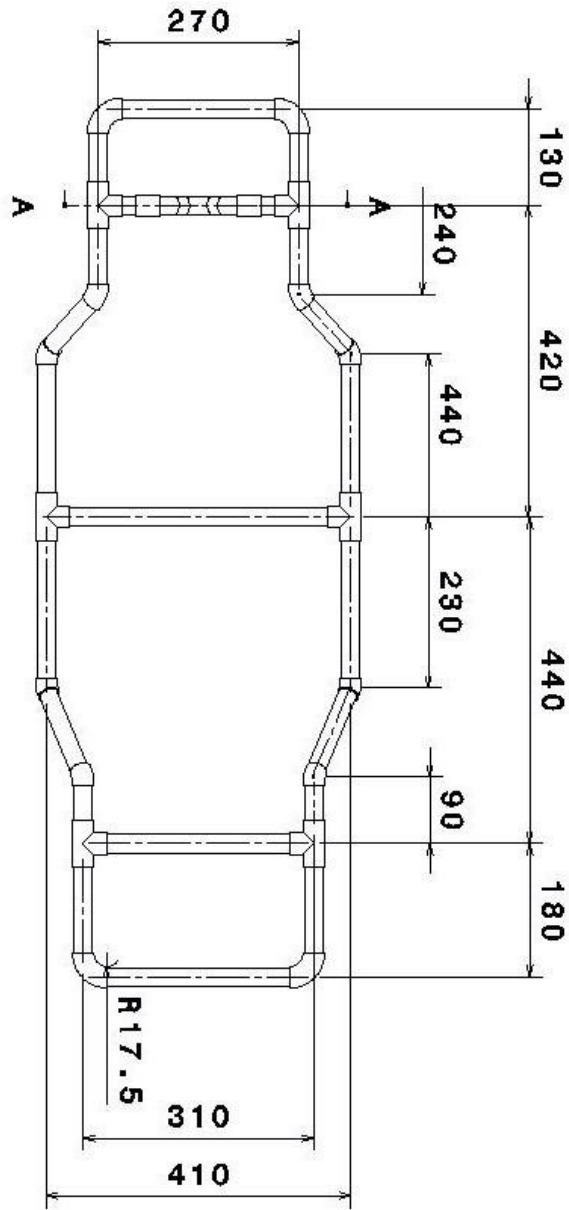
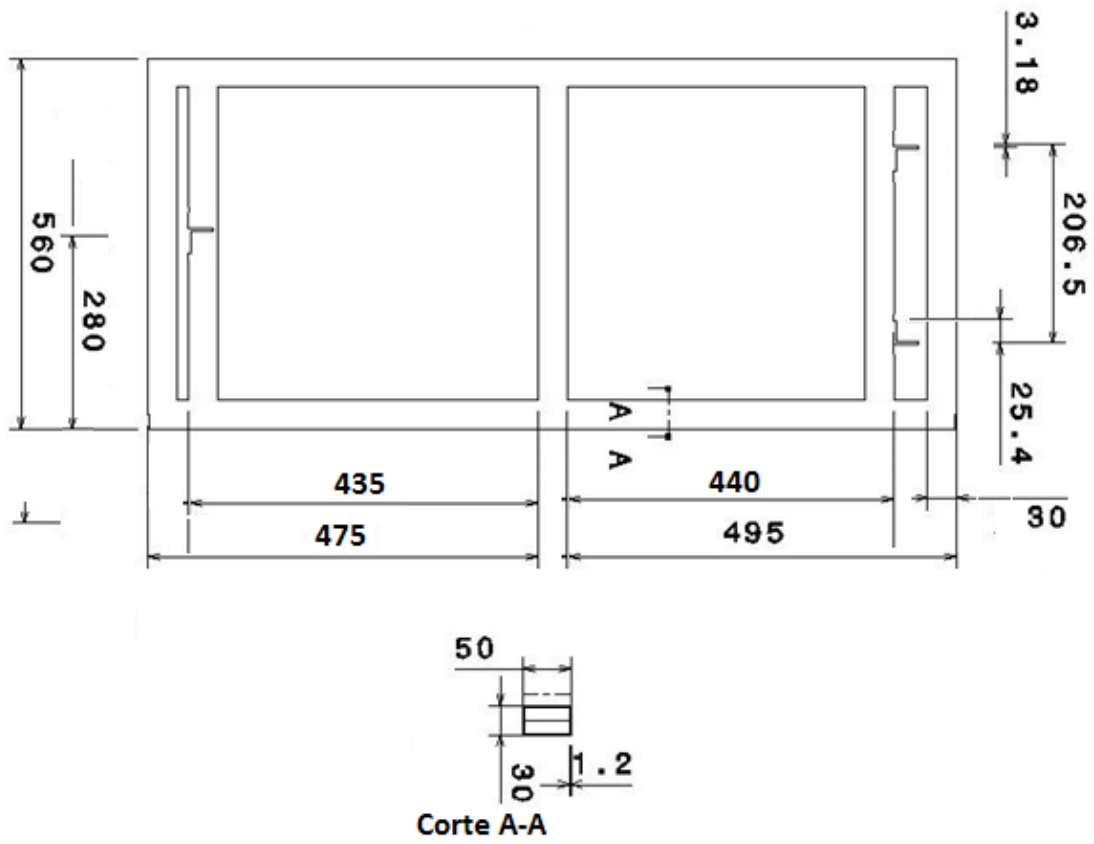


Figura A.4.1 –Dimensões do atuador pneumático utilizado de 12 mm. (Festo-2018) - disponível em < https://www.festo.com/cat/pt-br/br/data/doc_ptbr/PDF/PT/DSNU-ISO_PT.PDF>

VI. Anexo – Cotas do Chassi



VII. Anexo – Cotas da Bancada



VIII. Anexo – Memoriais de cálculo
Cálculo da incerteza do Ângulo (θ)

$$\begin{aligned} \sin\theta &= \frac{\Delta z}{L} \\ \Delta z &= |z_3 - z_4| \\ \theta(z_3, z_4, L) &= \sin^{-1}\left(\frac{|z_3 - z_4|}{L}\right) \\ \frac{\partial\theta(z_3, z_4, L)}{\partial z_3} &= \frac{1}{\sqrt{L^2 + z_3^2}} \\ \frac{\partial\theta(z_3, z_4, L)}{\partial z_4} &= \frac{1}{\sqrt{L^2 + z_4^2}} \\ \frac{\partial\theta(z_3, z_4, L)}{\partial L} &= -\frac{|z_3 - z_4|}{L^2 \sqrt{1 - \frac{(z_3 + z_4)^2}{L^2}}} \\ u(\theta) &= \frac{1}{\sqrt{L^2 + z_3^2}} * u(z_3) + \frac{1}{\sqrt{L^2 + z_4^2}} * u(z_4) + \frac{|z_3 - z_4|}{L^2 \sqrt{1 - \frac{(z_3 + z_4)^2}{L^2}}} * u(L) \end{aligned}$$

Onde L é igual a 270 mm e $u(L)$ é $\pm 0,1\text{mm}$.
Assim tem-se a Tab. (VIII.1)

Tabela VIII.1 – Incerteza do θ .

Carregamento	1	2	3
$u(\theta)$	0,0044	0,0110	0,0056
$u(\theta)^\circ$	0,26	0,63	0,32
$u(K)$	0,0866	0,0892	0,0284

IX. Anexo – Dados Experimentais. Deslocamentos nos pontos selecionados.

Tabela A9.1 – Deslocamentos dos pontos selecionados.

DADOS EXPERIMENTAIS											
2,2bar Flexão						2,2bar TORÇÃO					
1			2			3			4		
250,00	247,00	3,00	251,56	249,70	1,86	300,00	306,86	-6,86	301,26	294,34	6,92
250,00	247,80	2,20	252,38	250,70	1,68	300,00	307,72	-7,72	300,80	293,60	7,20
250,00	247,68	2,32	252,52	250,46	2,06	300,16	307,36	-7,20	301,00	293,84	7,16
250,10	247,68	2,42	252,46	250,44	2,02	300,12	307,10	-6,98	301,00	294,02	6,98
249,92	247,68	2,24	252,50	250,60	1,90	300,16	307,26	-7,10	300,92	294,00	6,92
250,12	247,38	2,74	252,56	250,14	2,42	300,26	307,10	-6,84	300,96	294,00	6,96
5,5 bar Flexão						5,5 bar TORÇÃO					
1			2			3			4		
250,00	243,46	6,54	252,30	245,88	6,42	300,70	317,65	-16,95	300,92	283,94	16,98
249,78	243,40	6,38	252,34	247,56	4,78	301,18	317,50	-16,32	300,70	284,30	16,40
249,92	243,24	6,68	252,56	247,36	5,20	301,10	317,56	-16,46	300,70	284,26	16,44
8,5 bar Flexão						8,5 bar TORÇÃO					
1			2			3			4		
250,00	241,12	8,88	252,54	245,10	7,44	280,00	306,58	-26,58	278,54	252,12	26,42
249,60	240,88	8,72	252,46	244,90	7,56	279,84	306,28	-26,44	278,60	252,32	26,28
249,72	240,70	9,02	252,70	245,00	7,70	279,92	306,18	-26,26	278,60	252,52	26,08

2,2bar Flexão						2,2bar TORÇÃO					
1			2			3			4		
Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro
2,49	0,32	0,84	1,99	0,25	0,66	-7,12	0,33	0,86	7,02	0,12	0,33
5,5 bar Flexão						5,5 bar TORÇÃO					
1			2			3			4		
Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro
6,53	0,15	0,68	5,47	0,85	3,86	-16,58	0,33	1,50	16,61	0,32	1,47
8,5 bar Flexão						8,5 bar TORÇÃO					
1			2			3			4		
Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro
8,87	0,15	0,68	7,57	0,13	0,59	-26,43	0,16	0,73	26,26	0,17	0,77

X. Anexo – Teste do atuador pneumático.

Tabela A10.1 – Relação de pressão, carga e força no atuador pneumático.

Pressão(bar)	Carga (Kg)									
2,2	2,47	2,47	2,47	2,47	2,48	2,48	2,48	2,48	2,49	2,5
	1,37	1,37	1,38	1,38	1,39	1,4	1,4	1,41	1,42	1,43
5,2	5,85	5,84	5,89	5,89	5,91	5,91	5,9	5,91	5,9	5,91
	3,88	3,87	3,84	3,85	3,86	3,85	3,85	3,87	3,85	3,87
8,2	9,14	9,13	9,13	9,17	9,14	9,12	9,15	9,15	9,14	9,12
	6,18	6,15	6,17	6,09	6,13	6,12	6,14	6,13	6,15	6,13

Carga (Kg)						
	Avanço			Recuo		
	Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro
2,2	2,48	0,01	0,02	1,40	0,02	0,05
5,2	5,89	0,03	0,06	3,86	0,01	0,03
8,2	9,14	0,02	0,04	6,14	0,03	0,06

Força (N)						
	Avanço			Recuo		
	Média	Desv. Pad	Erro	Média	Desv. Pad	Erro
2,2	24,32	0,10	0,23	13,68	0,20	0,47
5,2	57,79	0,25	0,58	37,86	0,13	0,29
8,2	89,65	0,15	0,35	60,22	0,25	0,58

XI. Anexo – Teste do atuador pneumático.

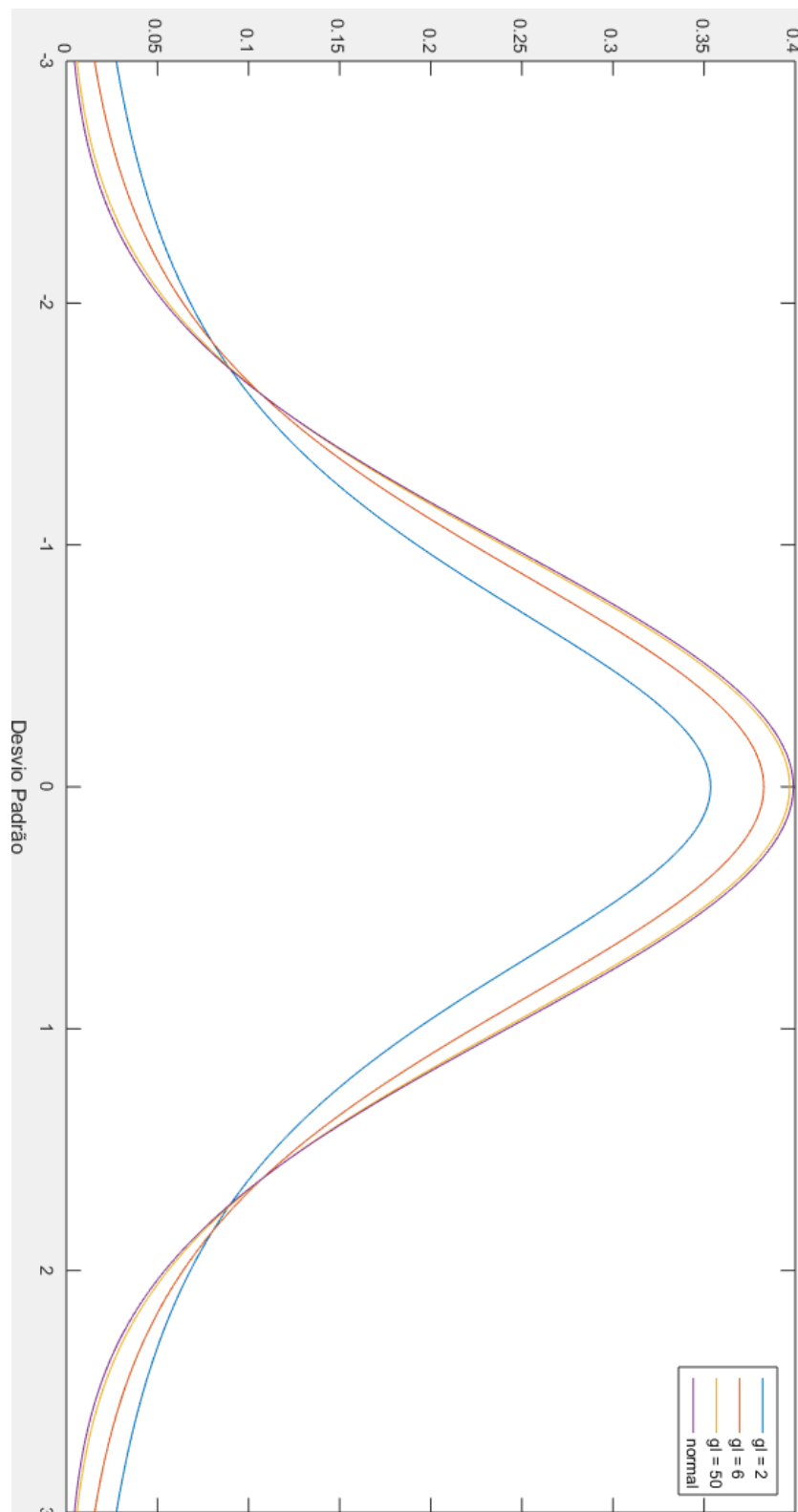


Figura A.10.1 – Curva t student com 2 (azul), 6 (vermelho) e 50 (amarelo) graus de liberdade e curva normal (roxo). As curvas foram plotadas no Matlab pelo (AUTOR)